



RICARDO LUÍS TELES DE CARVALHO **EFICIÊNCIA DE FOGÕES A BIOMASSA E
IMPACTOS NA QUALIDADE DO AR INTERIOR**



**RICARDO LUÍS TELES
DE CARVALHO**

**EFICIÊNCIA DE FOGÕES A BIOMASSA E IMPACTOS
NA QUALIDADE DO AR INTERIOR**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro e sob a co-orientação científica da Doutora Ana Margarida Costa, Investigadora em Pós-Doutoramento no Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos familiares e amigos que me acompanharam durante o meu percurso académico.

o júri

presidente

Joaquim José Borges Gouveia

Professor catedrático, Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial, Universidade de Aveiro

Luís Eugénio Pinto Teixeira de Lemos (arguente)

Professor coordenador, Departamento de Ambiente, Escola Superior de Tecnologia de Viseu, Instituto Superior Politécnico de Viseu

Luís António da Cruz Tarelho (orientador)

Professor auxiliar, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro

Ana Margarida Lobo Lourenço Costa (co-orientadora)

Investigadora em pós-doutoramento, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro

Agradecimentos

A presente tese de mestrado foi desenvolvida através do programa Erasmus vertente de estágios, financiado Agência Nacional para a Gestão do Programa Aprendizagem ao Longo da Vida.

O trabalho foi desenvolvido na Universidade de Aveiro (UA) e no Danish Building Research Institute – Aalborg University (SBI-AAU).

Na Dinamarca foram desenvolvidas actividades no âmbito do projecto "House heating with wood burning - energy efficiency and environment", financiado pela Environmental Protection Agency, Danish Ministry of the Environment. Este projecto contou com a colaboração de diversos fabricantes de equipamentos e do Technological Institute.

Em Portugal, o trabalho foi desenvolvido no âmbito das actividades do projecto financiado pela FCT PTDC/AGR-CFL/64500/2006 "Biomassa lenhosa para produção de energia: desenvolvimento de sistemas sustentáveis de fornecimento de bens e serviços de produção, regulação e conservação".

Um especial agradecimento aos orientadores do trabalho de mestrado, destacando o incentivo e conhecimento partilhado por parte do professor Luís Tarelho e à co-orientação da investigadora Margarida Costa.

Gostaria também de destacar a colaboração e empenho dos coordenadores do projecto na Dinamarca, nomeadamente aos investigadores Alireza Afshari, Ole Michael e Niels Bergsø.

palavras-chave

Eficiência energética, qualidade do ar interior, fogão a biomassa

resumo

A combustão residencial de biomassa é uma forma de produção de energia térmica considerada neutra do ponto de vista de CO₂ de origem fóssil, mas que pode ter impactos na qualidade do ar. O presente trabalho teve como objectivo analisar o desempenho energético e ambiental de diferentes fogões a biomassa utilizados em habitações unifamiliares.

Como resultado da aplicação de um modelo numérico de simulação dinâmica – BSIM Building Simulation – e das experiências realizadas em 6 habitações unifamiliares na Dinamarca verificou-se que os fogões a biomassa emitem energia térmica de forma intermitente, sendo que, a utilização dos fogões certificados conduziu a um sobreaquecimento das habitações com elevada eficiência energética.

Nas experiências realizadas em habitações unifamiliares na Dinamarca verificaram-se consumos anuais de energia final para aquecimento de espaços a variar entre os 9,0 e os 31,6 MWh, taxas de renovação de ar novo entre os 0,34 e os 1,02 h⁻¹, tendo-se determinado concentrações de partículas PM₁₀ e PM₁ acima dos 150 µg m⁻³, aquando da combustão de biomassa nos fogões a em edifícios residenciais construídos no ano de 2009. Verificou-se também que, a concentração de partículas ultra-finas variou consideravelmente após a ignição da combustão de biomassa para todos os fogões analisados, independentemente do ano de construção dos edifícios onde se realizaram as medições. Os caudais de emissão (valores máximos) de partículas ultra-finas, dos fogões a biomassa para o interior das habitações em estudo, variaram entre 9,19 x 10⁷ e 1,96 x 10¹⁵ partículas ultra-finas h⁻¹, tendo-se observado as concentrações mais elevadas para este tipo de partículas, nos ambientes interiores em estudo, no momento em que se verificaram os caudais de emissão de partículas mais elevados. Em geral, para os restantes parâmetros de caracterização da qualidade do ar não se verificaram impactos da combustão doméstica de biomassa na QAI.

Da análise energética ao recuperador de calor típico Português estimou-se uma eficiência térmica a variar entre os 50% e os 77%, dependendo da fase do ciclo de combustão de biomassa, sendo que a temperatura na câmara de combustão nestes sistemas varia entre os 100 e os 600 °C. Da análise do cálculo da eficiência para diferentes intervalos de tempo, podemos verificar que, durante a combustão de Freixo, a transferência de calor do fogão a biomassa para o interior do edifício é máxima para temperaturas na câmara de combustão superiores a 400 °C e caudais de ar de combustão de 30 Nm³ h⁻¹. O fluxo de calor total do equipamento para o interior do edifício foi de 6,25 kW, para um intervalo durante o ciclo de combustão, aquando a operação do sistema segundo as condições típicas de operação.

keywords

Energy efficiency, indoor air quality, wood burning stoves

abstract

The residential combustion of biomass is a form of production of thermal energy, considered neutral in terms of CO₂ produced from fossil fuels, but that may have impacts on air quality. This study aimed to analyze the energy and environmental performance of different biomass stoves used in private homes. As a result of applying a numerical model for dynamic simulation - BSIM Building Simulation - and the experiences carried out in 6 detached houses located in Denmark, it was found out that, the wood burning stoves emit thermal energy intermittently, and the use of certified appliances led to overheating of dwellings with high energy efficiency.

In experiments conducted in single family houses in Denmark, final energy consumption for residential heating varied between 9,0 and 36,6 MWh and air exchange rate varied between 0.34 and 1.02 h⁻¹. Concentrations of PM₁₀ and PM₁ were found to be above 150 µg m⁻³, when wood burning stoves were used for space heating in residential buildings constructed in the year of 2009. It was also found that, the concentration of ultra-fine particles varied considerably after ignition of biomass combustion for all stoves tested, independently of the year when the dwellings, where measurements were carried out, were constructed. The rates of emission (maximum values) of ultra-fine particles, from biomass stoves to the interior of the houses analysed in the developed case study, ranged between 9.19×10^7 and 1.96×10^{15} ultra-fine particles h⁻¹ and it was observed that, the highest indoor concentrations for this type of particles, occurred when the ultra-fine particles emission rate was the highest. In general, for the other parameters that characterize the indoor air quality (IAQ), there were no impacts of the combustion of biomass in the IAQ.

The energy analysis of the typical Portuguese wood burning stove handed in a thermal efficiency in the range from 50% to 77%, depending on the phase of the combustion cycle considered in this study. The temperature in the combustion chamber in these systems varied in between 100 and 600 °C. From the previous energy analysis, regarding the wood burning efficiency calculation for different time intervals, we can conclude that, during the wood combustion process, the heat transfer from the wood burning stove to the indoor space happens when the temperature in the combustion chamber is above 400 °C and combustion air flow rate is equal to 30 Nm³h⁻¹. The total heat flow of the tested equipment into the building was 6,25 kW for an interval during the combustion cycle operated under the typical conditions of utilization.

Índice

Índice	i
Índice de Figuras	iii
Índice de tabelas	vi
Nomenclatura	vii
1 Introdução	1
1.1 Estrutura do trabalho	4
1.2 Análise energética em edifícios residenciais	5
1.2.1 Características dos elementos construtivos	7
1.2.2 Fluxos de energia térmica em habitações	8
1.2.3 Sistemas energéticos em habitações	9
1.3 Aquecimento residencial a biomassa	10
1.3.1 Combustão de biomassa	10
1.3.2 Equipamentos de combustão residencial	11
1.3.3 Fogões a biomassa e certificação	13
1.3.4 Qualidade do Ar	15
1.3.5 Valores-guia para a QAI	23
1.3.6 Boas práticas de utilização dos fogões a biomassa	24
2 Trabalho experimental	25
2.1 Análise energética e à QAI em habitações - Dinamarca	26
2.1.1 Simulações energéticas em habitações	29
2.1.2 Caso de estudo em habitações unifamiliares	33
2.1.3 Medições de parâmetros de conforto térmico e QAI	33
2.2 Análise do desempenho energético de um fogão a biomassa - Portugal	33
2.2.1 Instalação e instrumentação	34
2.2.2 Recuperador de calor da Solzaima	36
2.2.3 Locais e pontos de amostragem	37
3 Resultados da análise energética e QAI em habitações - Dinamarca	39
3.1 Simulações energéticas	39
3.2 Caso de estudo em habitações unifamiliares	43
3.2.1 Medições de conforto térmico e QAI	44
3.2.2 Medições da taxa de renovação de ar	45
3.2.3 Consumos de energia em habitações	47
3.2.4 Medições de parâmetros de conforto térmico	51
3.2.5 Medições de parâmetros da QAI	54
3.2.6 Medições vs. Simulações	68
4 Análise do desempenho energético do fogão a biomassa Português	71

4.1.1	Cálculo de eficiência térmica do fogão a biomassa Português.....	73
4.1.2	Eficiência energética do fogão a biomassa	86
5	Discussão	87
6	Conclusões	91

Índice de Figuras

Figura 1-1 Central termoelétrica de co-geração a biomassa, resíduos, energia eólica e combustíveis fósseis com sistema de district heating, localizada na cidade de Copenhaga. ...	2
Figura 1-2 Edifício residencial com aquecimento central a piso radiante (bomba de calor) e fogão a biomassa, localizado numa zona rural na região de Copenhaga.	3
Figura 1-3 Habitação representativa de moradia Dinamarquesa unifamiliar.	7
Figura 1-4 Fluxos de energia num edifício residencial.	8
Figura 1-5 Amostra de biomassa pellets (esquerda) e caldeira a pellets com sistema mecânico automático de injeção de ar (direita).	12
Figura 1-6 Laboratório de ensaios da empresa de fabrico de fogões a biomassa HWAM – Dinamarca.	14
Figura 1-7 Partículas resultantes da combustão de biomassa	18
Figura 1-8 Concentração de PM ₁₀ numa habitação localizada numa zona urbana no Reino Unido, para 3 cenários distintos de actividades decorridas no interior de uma habitação tipo.	21
Figura 1-9 Concentração de PM _{2.5} numa habitação localizada numa zona urbana no Reino Unido, para 3 cenários distintos de actividades decorridas no interior de uma habitação tipo.	22
Figura 1-10 Concentração de CO numa habitação localizada numa zona urbana no Reino Unido, para 3 cenários distintos de actividades decorridas no interior de uma habitação tipo.	22
Figura 1-11 Ilustração do módulo de construção de biomassa para aplicação da técnica de ignição pelo topo.	24
Figura 2-1 Esquema sobre a metodologia de análise energética seguida no trabalho experimental realizado na Dinamarca e em Portugal.	25
Figura 2-2 Tipologias de habitação Dinamarquesa unifamiliar. Habitação construída na década de 80 em <i>Espegaerde</i> (esquerda) e habitação construída no ano 2008 em <i>Esrum</i> (direita)	26
Figura 2-3 Fogão de aquecimento doméstico a biomassa “Morsø 7648 Pedestal” – Certificado SWAN.	27
Figura 2-4 Modelo de um fogão <i>Mansory</i> - corte lateral.	29
Figura 2-5 Esquema do balanço energético ao reservatório climatizado e ventilado	30
Figura 2-6 Representação do modelo de geometria utilizada para a simulação térmica e dinâmica.	31
Figura 2-7 Instalação experimental para monitorização de parâmetros necessários ao cálculo de balanço energético do fogão a biomassa típico Português	35
Figura 2-8 Fogão a biomassa do fabricante Solzaima.	36
Figura 3-1 Consumos de energia primária (tep/ano) para aquecimento e arrefecimento de espaços em moradias com isolamento térmico na Dinamarca para fogões de ferro fundido (esquerda) 5kW e de tijolo 2 kW (direita).	40

Figura 3-2 Consumos de energia primária (tep/ano) para aquecimento e arrefecimento de espaços em moradias sem isolamento térmico na Dinamarca para fogões de ferro fundido (esquerda) 5kW e de tijolo 2 kW (direita).....	41
Figura 3-3 Consumos de energia final (MWh/ano) para aquecimento de espaços em moradias com isolamento na Dinamarca.....	41
Figura 3-4 Consumos de energia final (MWh/ano) e primária (tep/ano) para o aquecimento de espaços em habitações sem isolamento na Dinamarca.....	42
Figura 3-5 Contadores de partículas ultra-finas localizados no centro da sala de estar de um das habitações em estudo (esquerda) e num ponto no exterior de uma das habitações em estudo (direita).....	45
Figura 3-6 Esquema de localização dos pontos de medição seleccionados nas amostragens de QAI e taxas de renovação de ar novo.....	46
Figura 3-7 Equipamentos utilizados para o aquecimento de espaços na habitação A – caldeira a Gás natural (à esquerda) e fogão a biomassa (à direita).....	48
Figura 3-8 Consumos de energia final para o aquecimento de espaços e águas quentes sanitárias nas 6 habitações deste caso de estudo.	49
Figura 3-9 Consumos de energia final para o aquecimento de espaços nas 6 habitações do caso de estudo e valores de referência dados pelo regulamento Dinamarquês dos edifícios.	50
Figura 3-10 Tipologias de habitação Dinamarquesa unifamiliar. Habitação construída na década de 80 em <i>Espergæde</i> (B - esquerda) e habitação construída no ano 2009 em <i>Esrup</i> (E ₂ - direita).....	51
Figura 3-11 Temperatura e humidade relativa durante o mês de Abril no interior da habitação B e E ₂	52
Figura 3-12 Temperatura e humidade relativa durante o mês de Abril no exterior da habitação B e E ₂	52
Figura 3-13 Temperatura e humidade relativa durante o mês de Fevereiro na habitação E ₂ , com isolamento térmico.	53
Figura 3-14 Evolução da temperatura no interior e exterior da habitação B, durante a combustão de biomassa num fogão de massa térmica – dia 14 de Abril.	56
Figura 3-15 Evolução da temperatura no interior e exterior da habitação E ₂ , durante a combustão de biomassa num fogão de ferro fundido certificado – dia 22 de Abril.	57
Figura 3-16 Evolução da concentração de CO no interior e exterior das habitações B e E ₂ , durante os ensaios realizados em Abril de 2009.....	58
Figura 3-17 Evolução da concentração de CO ₂ no interior e exterior das habitações B e E ₂ , durante os ensaios realizados em Abril de 2009.....	59
Figura 3-18 Concentração de COVs totais durante a combustão de biomassa na habitação B.....	60
Figura 3-19 Concentração de COVs totais durante a combustão de biomassa para o edifício E ₂	60
Figura 3-20 Evolução da concentração de PM ₁₀ e PM ₁ ao longo do processo de combustão na habitação E ₁ em Abril.	61

Figura 3-21 Evolução da concentração de PM_{10} e PM_1 ao longo do processo de combustão na habitação E ₂ em Abril.....	62
Figura 3-22 Evolução da concentração de partículas ultra-finas ao longo do processo de combustão de um fogão de ferro fundido certificado (<i>Swan</i>) na habitação E ₂ - Fevereiro de 2010.....	66
Figura 3-23 Evolução da concentração de partículas ultra-finas ao longo do processo de combustão de um fogão de ferro fundido certificado (<i>Swan</i>) na habitação E ₂ - Fevereiro de 2010.....	67
Figura 3-24 Representação da abertura de entrada de ar de combustão secundário numa porta de ferro fundido instalada num fogão de massa térmica – ensaio na habitação C.	68
Figura 3-25 Consumos de energia final para aquecimento de espaços e temperaturas máximas atingidas no Inverno nas habitações do caso de estudo e repectivos valores obtidos nas simulações energéticas.....	70
Figura 4-1 Evolução da temperatura de chama na câmara de combustão e carga de biomassa ao longo de um ciclo de combustão da biomassa - Freixo.....	72
Figura 4-2 Evolução da Concentração CO e CO ₂ no fogão a biomassa ao longo de um ciclo de combustão de Freixo.....	73
Figura 4-3 Representação esquemática dos fluxos de calor nas paredes verticais (setas à esquerda e à direita) e por convecção forçada (Ar de ventilação), entre as paredes do fogão a biomassa e o interior do edifício.....	80
Figura 4-4 Evolução de parâmetros de análise energética ao fogão a biomassa típico Português – medições para cada 10 minutos.	86

Índice de tabelas

Tabela 1-1 Requisitos gerais das habitações unifamiliares em Portugal e na Dinamarca.....	6
Tabela 1-2 Características gerais de alguns fogões de combustão a lenha na Dinamarca e em Portugal	15
Tabela 1-3 Factores de emissão de PM _{2.5} , CO e COVs totais para a combustão residencial de biomassa em recuperadores de calor modernos.....	16
Tabela 1-4 Rácios da concentração de poluentes entre o interior e o exterior (média 24h) no inverno para o norte e sul da Europa.	20
Tabela 1-5 Concentrações máximas de referência estabelecidas pelo Decreto-Lei 79/2006 [18] vs. Valores guia estabelecidos pela OMS	23
Tabela 2-1 Características da experiência realizada pelo Instituto Tecnológico (TI) numa casa unifamiliar em Outubro de 2009, durante a utilização de um fogão morsø de ferro fundido...	28
Tabela 2-2 Características das cargas térmicas consideradas no modelo.	32
Tabela 3-1 Esquema das simulações térmicas realizadas no âmbito do trabalho.....	39
Tabela 3-2 Resumo das características gerais das medições realizadas.	47
Tabela 3-3 Resumo de resultados obtidos na campanha de medições da QAI realizada em Abril de 2009.....	54
Tabela 3-4 Informações sobre os ensaios realizados em 2 tipos distintos de habitações.	55
Tabela 3-5 Resumo de resultados obtidos nas medições de partículas ultra-finas em Abril de 2009, Janeiro e Fevereiro de 2010 – 1 e 2ª campanha de amostragem.	65
Tabela 3-6 Percentagem dos consumos de energia final gerada pela combustão de biomassa para as 6 habitações analisadas neste caso de estudo e respectivos valores obtidos nas simulações energéticas realizadas.	69
Tabela 4-1 Características do Freixo (<i>Fraxinus Angustifolia Vahl</i>) utilizado nos ensaios de combustão no fogão típico Português.....	71
Tabela 4-2 Humidade do efluente gasoso resultante do processo de combustão completa de biomassa, para cada intervalo de tempo.	76
Tabela 4-3 Fluxos de calor e respectiva potência térmica dissipada (média de 10 minutos) - convecção natural, através das paredes exteriores do fogão.....	82
Tabela 4-4 Potência térmica máxima (média de 10 minutos) – radiação, dissipada através das paredes exteriores do fogão para o ambiente.	83
Tabela 4-5 Potência térmica mínima e média dissipada do fogão a biomassa Português para o interior do edifício.	85

Nomenclatura

λ	Razão estequiométrica	
η_f	Eficiência térmica do fogão a biomassa	$[\%]$
ρ_b	Massa volúmica da biomassa	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_{cc}	Massa volúmica de combustível líquido convencional	$[kg \cdot m^{-3}]$
β	Coeficiente de expansão volúmica	$[K^{-1}]$
ε	Emissividade de um corpo radiativo	
α	Absortividade de um corpo radiativo	
ν	Viscosidade cinemática do ar	$[m^2 s^{-1}]$
ΔT_{ie}	Diferença de temperatura entre o interior e exterior do edifício	$[K]$
A_s	Área da superfície sólida	$[m^2]$
c_{pi}	Capacidade calorífica do composto i a pressão constante	$[kJ \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}]$
\bar{c}_{pi}	Capacidade calorífica média do composto i a pressão constante, entre T e T°	$[kJ \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}]$
\bar{c}_{pa}	Capacidade calorífica média do ar à temperatura ambiente, a pressão constante, entre T e T°	$[kJ \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}]$
c_r	Concentração de partículas ultrafinas na no interior do edifício	$[partículas \cdot m^{-3}]$
c_s	Concentração de partículas ultrafinas na zona de insuflação (exterior)	$[partículas \cdot m^{-3}]$
$D_{climáticos}$	Dados climáticos da região em estudo	
E_{fb}	Potência útil do fogão a biomassa	$[MWh \cdot ano^{-1}]$
E_{GN}	Consumo anual de energia final produzida - caldeira a gás natural	$[MWh]$

E_{perdas}	Perdas anuais de energia final do edifício devido ao ar de combustão	$[MWh]$
E_{SE1}	Consumo anual de energia final para aquecimento de espaços	$[MWh]$
E_{th}	Consumo anual total de energia final para aquecimento	$[MWh]$
f_c	Eficiência da caldeira a gás natural	$[\%]$
g	Aceleração da gravidade	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
h_a	Entalpia específica do ar atmosférico	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
\bar{h}_c	Coeficiente de convecção natural do ar em placas	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
h_{fg}	Calor latente de vaporização da água à temperatura de referência (T^o)	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
k	Condutividade térmica do ar	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
L_c	Comprimento característico da superfície de uma placa	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
\dot{m}_a	Caudal mássico de ar atmosférico à temperatura e pressão ambiente	$[kg \cdot s^{-1}]$
\dot{m}_{ac}	Fluxo mássico do ar de combustão	$[kg \cdot s^{-1}]$
\dot{m}_b	Consumo de biomassa	$[kg \cdot s^{-1}]$
\dot{m}_{ba}	Consumo de biomassa	$[kg \cdot ano^{-1}]$
\dot{M}	Caudal de partículas ultra-finas no edifício	$[partículas \cdot h^{-1}]$
M_j	Massa molar do composto j nos gases de exaustão	$[kg \cdot kmol^{-1}]$
\dot{n}_i	Fluxo molar do componente i nos gases de exaustão	$[mol \cdot s^{-1}]$
Nu	Número de Nusselt	
P_{atm}	Pressão atmosférica	$[Pa]$

PL	Carga térmica dos ocupantes da habitação	
PCI_b	Poder calorífico inferior da biomassa	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
PCI_{cc}	Poder calorífico inferior do combustível convencional	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
Pr	Número de Prandtl	$[MWh \cdot ano^{-1}]$
\dot{Q}_{ac}	Fluxo de calor transferido pelo ar de combustão	$[kW]$
\dot{Q}_b	Potência térmica produzida pelo processo de combustão de biomassa	$[kW]$
\dot{Q}_c	Potência térmica transferida por convecção natural	$[kW]$
\dot{Q}_{cf}	Potência térmica transferida por convecção forçada	$[kW]$
$\dot{Q}_{entrada}$	Potência térmica à entrada do recuperador de calor a biomassa	$[kW]$
\dot{Q}_{GE}	Potência térmica perdida nos gases de combustão	$[kW]$
$\dot{Q}_{latente}$	Potência térmica latente libertado na combustão de biomassa	$[kW]$
\dot{Q}_{rad}	Potência térmica emitida por radiação	$[kW]$
$\dot{Q}_{saída}$	Potência térmica perdida através da chaminé do recuperador de calor a biomassa	$[kW]$
r	Taxa de remoção de partículas	$[h^{-1}]$
R	Constante dos gases perfeitos	$[kJ \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}]$
R_{aL}	Número de Rayleigh	
T^o	Temperatura de referência	$[K]$
T_a	Temperatura do ar atmosférico	$[K]$
$T_{entrada}$	Temperatura à entrada de uma conduta	$[K]$

T_f	Temperatura de filme	$[K]$
T_{GE}	Temperatura dos gases de exaustão	$[K]$
$T_{paredes}$	Temperatura das paredes do fogão	$[K]$
T_{PD}	Taxa de decaimento da concentração de partículas ultra-finas	$[h^{-1}]$
T_s	Temperatura da superfície sólida	$[K]$
$T_{saída}$	Temperatura à saída de uma conduta	$[K]$
\dot{T}_{VENT}	Taxa de renovação de ar novo	$[h^{-1}]$
U	Coeficiente de transmissão térmica	$[W \cdot m^{-2} K^{-1}]$
U_i	Coeficiente de transmissão térmica do elemento de construção i	$[W \cdot m^{-2} K^{-1}]$
V	Volume do interior do edifício	$[m^3]$
\dot{V}_i	Caudal volumétrico de renovação de ar novo à entrada e à saída do reservatório em estudo	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$
\dot{V}_{ac}	Caudal volumétrico de ar combustão	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
\dot{V}_{Nac}	Caudal volumétrico de ar combustão em condições normais	$[N \cdot m^3 \cdot h^{-1}]$
\dot{V}_b	Consumo de biomassa por ano	$[kg \cdot ano^{-1}]$
\dot{V}_{cc}	Consumo de combustível convencional por ano	$[m^3 \cdot ano^{-1}]$
\dot{V}_{GE}	Caudal volumétrico dos gases de exaustão	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
\dot{V}_{NGE}	Caudal volumétrico dos gases de exaustão em condições normais	$[N \cdot m^3 \cdot h^{-1}]$
W_a	Consumo específico actual de ar de combustão (base seca)	$[kg_{ar} \cdot kg_F^{-1} bs]$
w_{CE}	Fracção mássica de Carbono nas Escórias (base seca)	$[kgC \cdot kg_E^{-1} bs]$

W_{CF}	Fracção mássica de Carbono na biomassa (base seca)	$[kgC \cdot kg_F^{-1}bs]$
W_{CV}	Fracção mássica de Carbono no material Volante (base seca)	$[kgC \cdot kg_V^{-1}bs]$
W_{EF}	Fracção mássica de Escórias na biomassa (base seca)	$[kgE \cdot kg_F^{-1}bs]$
W_{HF}	Fracção mássica de Hidrogénio na biomassa (base seca)	$[kgH \cdot kg_F^{-1}bs]$
W_{NF}	Fracção mássica de Azoto na biomassa (base seca)	$[kgN \cdot kg_F^{-1}bs]$
W_{OF}	Fracção mássica de Oxigénio na biomassa (base seca)	$[kgO \cdot kg_F^{-1}bs]$
W_{SF}	Fracção mássica de Enxofre na biomassa (base seca)	$[kgS \cdot kg_F^{-1}bs]$
W_{VF}	Fracção mássica de material Volante na biomassa (base seca)	$[kg_V \cdot kg_F^{-1}bs]$
W_{WF}	Fracção mássica de Água na biomassa (base seca)	$[kgH_2O \cdot kg_F^{-1}bs]$
W_{ZF}	Fracção mássica de Cinzas na biomassa (base seca)	$[kgZ \cdot kg_F^{-1}bs]$
W_s	Consumo estequiométrico de O_2 (base seca)	$[kgO_2 \cdot kg_F^{-1}bs]$
W_{sA}	Consumo estequiométrico específico de ar de combustão (base seca)	$[kgAr \cdot kg_F^{-1}bs]$
\dot{W}_{jF}	Fracção mássica do elemento químico j (C, H, N, O, S) na biomassa F	$[kg_j \cdot kg_F^{-1}]$
$\dot{Y}_{s,j}$	Necessidades estequiométricas de O_2 para oxidar o elemento j	$[kg_j \cdot kg_F^{-1}]$
z	Excesso de ar de combustão	$[\%]$

1 INTRODUÇÃO

As mudanças no estilo de vida da população nos países desenvolvidos têm vindo a provocar alterações ao nível dos consumos de energia em edifícios, nas suas condições de conforto térmico e na qualidade do ar interior. Na Europa 40% da energia total primária é consumida nos edifícios, sendo importante aumentar a sua eficiência energética [1]. Consequentemente, a actual política energética Europeia promove planos e programas de conservação e racionalização de energia no sector dos edifícios, através da melhoria das suas características térmicas e a implementação de novas tecnologias de produção de energia mais sustentáveis. No sector residencial, a energia consumida para aquecimento das casas pode ser gerada através da produção centralizada (grande escala) e/ou descentralizada de calor e/ou electricidade (pequena escala) [2].

De entre os sistemas energéticos de produção de energia de grande escala destacam-se as centrais termoeléctricas com sistemas de co-geração. Após a crise no sector da energia da década de 70, foram implementados no norte da Europa novos sistemas de aquecimento residencial, designados por *district heating*, que aproveitam o calor gerado em centrais termoeléctricas para o aquecimento de casas localizadas na região da central de co-geração. Na cidade de Copenhaga, por exemplo, existe um sistema deste tipo (Figura 1-1) que abastece 98% da cidade, gerando energia a partir da incineração de resíduos sólidos urbanos, gás natural, biocombustíveis sólidos, entre outras fontes de energia. Os fluxos de calor gerados nas centrais de co-geração são transportados através de condutas distribuídas pela cidade.

É reconhecido que, a biomassa é um recurso natural de energia renovável, neutro do ponto de vista da geração de CO₂ de origem fóssil, utilizado para a produção de calor e electricidade [3]. Actualmente, incentivos à geração de energia eléctrica e térmica de grande escala baseada na combustão de biomassa estão a tornar esta opção economicamente viável, sendo que algumas das centrais existentes na Dinamarca e em Portugal são abastecidas maioritariamente por este combustível [4; 5].



Figura 1-1 Central termoelectrica de co-geração a biomassa, resíduos, energia eólica e combustíveis fósseis com sistema de district heating, localizada na cidade de Copenhaga [6].

Em zonas rurais, em regiões onde não existem infra-estruturas de transporte e distribuição de calor produzido de forma centralizada, a utilização de sistemas de aquecimento descentralizado é uma prática comum. Após a crise do petróleo na década de 70 a biomassa continuou a ser utilizada para a geração de calor a nível local, podendo ser considerada como uma solução viável do ponto vista técnico e económico para o aquecimento residencial. A utilização de caldeiras a biomassa para aquecimento de espaços e águas quentes sanitárias (AQS), bem como a combustão de biomassa em equipamentos apropriados, constitui uma solução para o aquecimento doméstico em vários países Europeus.

Actualmente, na Dinamarca, cerca de 26% da população utiliza frequentemente fogões a biomassa, sendo estimado que 8% do aquecimento de espaços em habitações Dinamarquesas é realizado com recurso a estes sistemas [7]. Em Portugal, estima-se que 32% das habitações utilizem lareiras ou fogões a biomassa, sendo essa utilização mais frequente no aquecimento doméstico em zonas rurais [8].

No entanto, o processo de combustão de madeira, sob condições inadequadas, pode causar emissões consideráveis de diversas substâncias poluentes, como por exemplo a emissão de elevadas quantidades de partículas com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 10 μm (PM_{10}), Monóxido de Carbono (CO) e Compostos Orgânicos Voláteis totais (COVs).



Figura 1-2 Edifício residencial com aquecimento central a piso radiante (bomba de calor) e fogão a biomassa, localizado numa zona rural na região de Copenhaga [Carvalho, R., 2009].

Apesar do facto da maioria dos equipamentos fabricados e comercializados na Europa nos últimos 10-15 anos serem certificados de acordo com as normas Europeias EN 13240:2003 (*Roomheaters fired by solid fuels – Requirements and test methods*) e EN 13229:2001 (*Inset appliances including open fires fired by solid fuels*), o conhecimento sobre a sua performance energética e ambiental no dia-a-dia dos seus utilizadores é ainda limitado [9;10;11].

Para além dos seus impactos na qualidade do ar exterior, a combustão residencial de biomassa também pode gerar níveis elevados de poluição dos ambientes interiores, dependendo dos sistemas de combustão utilizados [12] e do nível de ventilação dos edifícios. É reconhecido que, as pessoas passam grande parte do seu tempo em ambientes interiores (cerca de 90%) e que, a exposição a concentrações elevadas de poluentes do ar interior pode estar associada a problemas ao nível da saúde humana. [13].

O presente trabalho consiste no estudo da eficiência energética de fogões a biomassa utilizados no aquecimento de residências e do seu impacto na qualidade do ar interior (QAI).

1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho tem como objectivo caracterizar as condições de operação de fogões a biomassa em edifícios na Dinamarca e em Portugal, com vista à melhoria do seu desempenho energético. Trata-se de um estudo integrado sobre a influência do processo de combustão doméstica de biomassa ao nível do conforto térmico e da qualidade do ar interior em habitações (QAI). Este trabalho contemplará dois tipos de análise, nomeadamente uma análise energética e à QAI em edifícios residenciais, bem como a análise energética de um fogão a biomassa Português.

No primeiro capítulo será apresentado o estado da arte sobre aquecimento doméstico a biomassa em habitações, através da pesquisa de informação relativa às características gerais de construção e ao nível dos consumos energéticos em habitações em cada um dos países, bem como condições gerais de operação de fogões a biomassa na Dinamarca e em Portugal, com base na literatura fornecida por fabricantes e entidades de certificação de fogões a biomassa. No mesmo capítulo serão abordadas questões relacionadas com a QAI, nomeadamente um enquadramento acerca da natureza e origem das fontes de poluição do ar interior e informação recolhida na literatura analisada sobre rácios de concentração interior/exterior (I/O) para os países onde se realizou este estudo.

No segundo capítulo será apresentada a descrição dos procedimentos seguidos no trabalho experimental e simulações energéticas realizadas no âmbito dos trabalhos realizados na Dinamarca e em Portugal, respectivamente. Relativamente ao caso de estudo na Dinamarca, será apresentada a metodologia seguida no estudo sobre consumos energéticos, conforto térmico e qualidade do ar interior em habitações unifamiliares que utilizam fogões a biomassa. Para o caso de estudo Português, seguir-se-á a descrição do procedimento seguido para realizar o balanço energético ao fogão típico Português.

No terceiro capítulo apresentar-se-ão os resultados obtidos no caso de estudo realizado na Dinamarca, relativos à caracterização do processo de aquecimento doméstico a biomassa e os seus impactos ao nível do conforto térmico e QAI em moradias.

No quarto capítulo serão apresentados os procedimentos e resultados obtidos relacionados com o balanço energético, a eficiência térmica e os processos de transferência de calor associados ao fogão Português.

No quinto e sexto capítulos é realizada a discussão e conclusão, respectivamente, sobre o comportamento térmico de fogões a biomassa em habitações e a sua influência na QAI. Serão ainda apresentadas algumas sugestões para uma melhor integração de sistemas de aquecimento doméstico a biomassa em edifícios residenciais.

1.2 ANÁLISE ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS

A estratégia europeia para a energia incentiva e regulamenta a melhoria do desempenho energético dos edifícios residenciais e respectivos sistemas energéticos. A Directiva Europeia 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, “vem promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios na Comunidade, tendo em conta as condições climáticas externas e as condições locais, bem como as exigências em matéria de clima interior e a rentabilidade económica” [1].

Na sequência desta directiva comunitária, os estados membros têm vindo a implementar regulamentos nacionais relativos às características de comportamento térmico de edifícios, tendo sido desenvolvido um método de cálculo da eficiência energética para os novos edifícios residenciais. Os regulamentos integram factores como o isolamento térmico, a eficiência de funcionamento de sistemas de aquecimento e ar condicionado, instalações de energias renováveis, bem como as características de concepção das habitações. Os regulamentos Dinamarquês e Português para os edifícios (Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios - RCCTE - e Regulamento Dinamarquês dos Edifícios – BR2008) estabelecem requisitos de relativos às necessidades globais de energia primária (N_t) e requisitos de qualidade térmica e ambiental de referência para as habitações unifamiliares, nomeadamente valores limite para os coeficientes de transmissão térmica dos elementos da envolvente (U), temperatura interior de conforto e taxas mínimas de renovação de ar novo, entre outros.

As novas residências tendem para o conceito de *low energy houses* ou até mesmo edifícios passivos. Nos países do norte da Europa, as habitações são caracterizadas pela sua elevada estanquidade e com baixas taxas de infiltração. A sua classificação energética dependerá também do tipo de fontes de energia primária utilizadas, bem como das condições de conforto térmico atingidas nos ambientes interiores. Na Tabela 1-1

apresentam-se os requisitos relativos alguns dos requisitos estabelecidos para habitações unifamiliares em Portugal e na Dinamarca [14;15].

É de referir que, para o caso Português, calculou-se o valor limite relativo às necessidades globais de energia primária (N_{tc}) para habitações localizadas na zona região de Lisboa. Por outro lado, o cálculo da taxa de renovação de ar novo para a Dinamarca teve em conta o volume médio das habitações Dinamarquesas unifamiliares.

Tabela 1-1 Requisitos gerais das habitações unifamiliares em Portugal e na Dinamarca.

Parâmetro / país da UE	Portugal RCCTE 2006 [14]	Dinamarca BR 2008 [15]
Necessidades globais energia primária ($\text{kWh m}^{-2}\text{ano}^{-1}$)	120 ^a	90 ^c
Taxa de renovação de ar (h^{-1})	0,6	0,5
U referência – parede exterior vertical ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	0,7 ^b	0,4
Temperatura de conforto ($^{\circ}\text{C}$)	20-25	20

^a Consumo total de energia primária – valor calculado no 5º do artigo 15º para a zona de Lisboa. Tem em conta o factor de forma e graus dia, para uma habitação unifamiliar com 120 m^2 de área de pavimento.

^b Considerou-se a zona climática I1 – zona de Lisboa

^c Consumo de energia útil para aquecimento, arrefecimento, ventilação e águas quentes sanitárias de uma habitação representativa da moradia unifamiliar Dinamarquesa (com uma área de pavimento de 120 m^2) [15].

Em Portugal, devido ao seu clima temperado marítimo, muitos edifícios residenciais usufruem apenas de ventilação natural, sendo os requisitos das características da envolvente diferentes dos valores estabelecidos em países com climas frios. Em Portugal, o RCCTE estabelece como requisito mínimo para as taxas de renovação de ar em edifícios residenciais o valor de 0,6 h^{-1} [14].

Na Dinamarca, onde as temperaturas de inverno podem ser negativas, predominam os sistemas de ventilação mecânica, por vezes combinados com sistemas de aquecimento centralizado. Por sua vez, o regulamento de edifícios Dinamarquês (BR 2008) estabelece que os edifícios residenciais devem ter uma taxa de renovação de ar novo mínima de 0,5 h^{-1} , sendo que estes edifícios apresentam elevada estanquidade e eficiência térmica [15].

Na Dinamarca tem-se vindo a verificar que, a operação de fogões a biomassa pode provocar sobreaquecimento das habitações, devido à forma como a potência emitida para o espaço a climatizar varia ao longo do ciclo de combustão. É de referir que, por cada grau acima da temperatura de conforto, estimam-se perdas de calor da ordem dos 7% da energia total consumida pelo edifício [15].

O processo de certificação dos edifícios residenciais depende das características dos seus elementos construtivos e dos sistemas energéticos utilizados. Um dos objectivos do presente trabalho está relacionado com a análise do comportamento térmico de diversos sistemas de aquecimento em habitações unifamiliares na Dinamarca.

1.2.1 CARACTERÍSTICAS DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Na Dinamarca, as habitações unifamiliares (Figura 1-3) são constituídas por uma parede exterior (envolvente exterior) em betão ou em tijolo, integrando um isolamento de lã mineral com a espessura de 100 mm. O coeficiente seu coeficiente de transmissão térmica encontra-se compreendido entre os $0,2 - 0,3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, tendo a espessura total da parede exterior cerca de 330 mm. Por sua vez, o pavimento em contacto com o solo é constituído por *Linóleo*, betão armado reforçado, poliestireno e Leca (pellets de argila expandida). No que diz respeito à cobertura, esta é normalmente constituída por madeira de pinho, cofragem, compostos de lã e telhas.



Figura 1-3 Habitação representativa de moradia Dinamarquesa unifamiliar [16].

1.2.2 FLUXOS DE ENERGIA TÉRMICA EM HABITAÇÕES

As necessidades anuais globais de energia térmica numa habitação incluem as necessidades de energia para aquecimento, arrefecimento e águas quentes sanitárias (AQS). As cargas térmicas numa residência estão associadas aos fluxos térmicos pela envolvente opaca, envidraçados, ventilação natural ou forçada, bem como aos ganhos internos e solares (Figura 1-4). A inércia térmica é outro aspecto que deverá ser tomado em conta no cálculo das necessidades globais de energia térmica, pelo que é essencial conhecer que tipo de construções e sistemas energéticos existem nos edifícios [14].

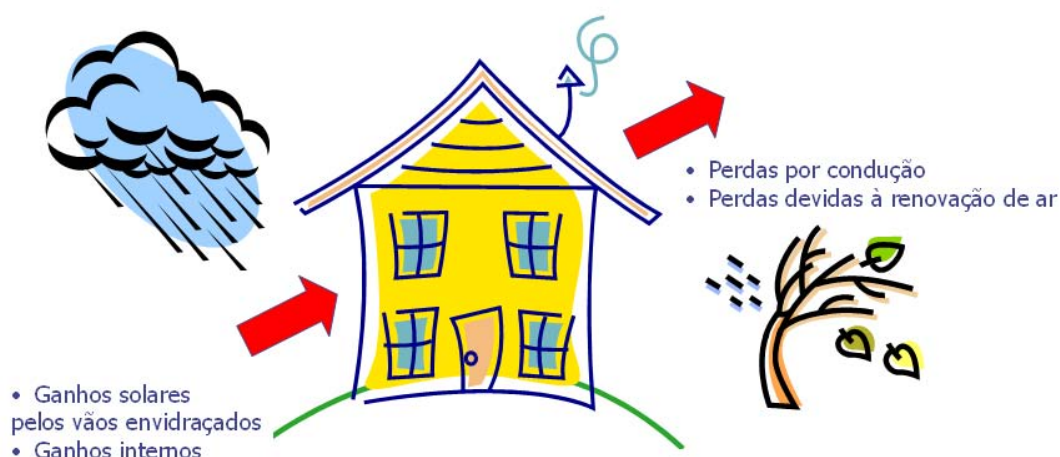


Figura 1-4 Fluxos de energia num edifício residencial [17].

A integração de sistemas energéticos deverá ser realizada tendo em conta as reais necessidades anuais de consumo de energia térmica. Uma análise dinâmica dos fluxos de energia em habitações contribuirá para uma melhor utilização da energia, através da integração de sistemas de aquecimento em função das condições meteorológicas do local em estudo, dos elementos construtivos e das rotinas dos ocupantes das habitações em estudo.

Por outro lado, para garantir a qualidade do ar interior deve assegurar-se a uma taxa de renovação de ar mínima nos edifícios que, para a estação de aquecimento, pode estar associada a fluxos de energia perdida em resultado do aumento dos caudais de renovação de ar. Tais perdas de energia devem ser consideradas no balanço energético das habitações.

1.2.3 SISTEMAS ENERGÉTICOS EM HABITAÇÕES

Para satisfazer as necessidades de aquecimento de espaços e AQS os edifícios podem ser abastecidos com energia térmica proveniente de redes de distribuição de calor, produzido de forma centralizada, e/ou através de sistemas de queima de combustíveis e/ou equipamentos eléctricos integrados nos edifícios. De entre os sistemas de produção descentralizada de calor, constam as caldeiras, fogões de ferro fundido ou em aço, fogões de massa térmica e aquecedores eléctricos (utilizam electricidade gerada de forma centralizada ou descentralizada). Passam-se a apresentar algumas definições importantes para a compreensão deste trabalho.

- **Co-geração:** Aproveitamento a nível local do calor residual originado nos processos termodinâmicos de geração de energia eléctrica, que de outra forma seria desperdiçado. O processo de produção de energia eléctrica em centrais termoeléctricas gera grandes quantidades de energia térmica, a qual pode ser transportada a partir de vapor de água ou água líquida e ser reutilizada no processo de geração de electricidade e/ou distribuída através de um sistema de *district heating*.
- **District Heating:** Sistema de distribuição de calor gerado numa central de conversão de energia, para o aquecimento de edifícios residenciais e de serviços. A energia térmica é usualmente produzida em centrais termoeléctricas de co-geração, através da queima de combustíveis fósseis, biomassa, ou através de outras fontes de energias renováveis. Estes sistemas apresentam elevadas eficiências globais de funcionamento e promovem o controlo da poluição.
- **Caldeira:** Máquina térmica que gera fluxos de calor por aquecimento de um fluído, com ou sem mudança de fase, através da queima de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, ou através de energia eléctrica. Os combustíveis podem ser o gás natural, petróleo, a biomassa, entre outros [14].
- **Bomba de calor:** É uma máquina térmica, que utiliza o princípio da máquina frigorífica, extraindo calor a baixa temperatura (arrefecimento) e rejeita calor a uma temperatura mais elevada (aquecimento), tornando-se possível a utilização de um ou dois dos referidos efeitos [18].
- **Ventilação:** É um processo de renovação do ar, num dado espaço, por meios mecânicos ou naturais. No primeiro caso, ocorre renovação do ar interior por

extracção de ar do espaço (ar de extracção) e insuflação de ar exterior ou de ar tratado numa mistura de ar novo vindo do exterior e de ar de retorno, utilizando um sistema de condutas e ventiladores como propulsores de ar. A ventilação natural é um processo de renovação de ar interior por ar atmosférico novo, recorrendo apenas a aberturas na envolvente com área adequada, auto-controladas ou por regulação manual, e aos mecanismos naturais do vento e das diferenças de temperatura causadoras de movimento de ar [18].

- Sistemas de ventilação mecânica: É a instalação que permite a renovação do ar interior por ar novo, recorrendo a ventiladores movidos a energia eléctrica [14].
- Sistema de climatização centralizado: É um sistema em que o equipamento necessário para a produção de frio ou calor (e para a filtragem, a humificação e a desumidificação, caso existam) se situa num local distinto dos espaços a climatizar, sendo o frio ou calor (e humidade), no todo ou em partes, transportado por um fluído térmico aos diferentes locais a climatizar [14].

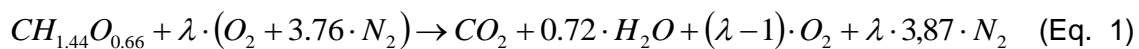
1.3 AQUECIMENTO RESIDENCIAL A BIOMASSA

O aquecimento doméstico de espaços e/ou AQS a biomassa pode ser realizado de forma centralizada, através da utilização de caldeiras a biomassa, ou através de fogões a biomassa. As caldeiras a biomassa têm a vantagem de produzir calor, sem afectar directamente a qualidade do ar interior (QAI), enquanto os fogões a biomassa pode causar impactos directos na qualidade do ar interior. O conhecimento do processo de combustão de diferentes tipos de biomassa, as características de operação dos sistemas de produção, transporte e armazenamento de calor é essencial para implementar medidas de eficiência energética causadoras de menores impactos no ambiente.

1.3.1 COMBUSTÃO DE BIOMASSA

A combustão de madeira ou pellets constitui um processo de conversão termoquímica que pode ser aplicado na produção de calor a nível doméstico, consistindo num conjunto de diversas reacções heterogéneas e homogéneas que decorrem consecutivamente, nomeadamente a secagem, pirólise, gasificação, combustão de carbonizado e voláteis.

A reacção de combustão completa para uma biomassa típica encontra-se transcrita na equação 1:



Sendo $CH_{1.44}O_{0.66}$ a composição média da biomassa típica e λ o coeficiente estequiométrico.

Ao nível do consumo doméstico de biomassa podem existir combustíveis provenientes de árvores angiospérmicas de folha caduca, geralmente existentes em climas temperados e boreais, designadas de *hardwood*, e madeiras provenientes de árvores coníferas – *softwood*. O primeiro tipo de biomassa apresenta normalmente uma maior energia de activação da reacção de combustão que as biomassas do tipo *softwood*, no entanto, o processo de queima deste tipo de madeira é usualmente mais longo que na combustão de uma *softwood*. Neste trabalho, realizaram-se ensaios de queima de *hardwood* do tipo Bétula (*Fagus*), existente em climas temperados na Europa, e o Freixo (*Fraxinus Angustifolia Vahl*), presente na floresta Portuguesa [19].

Na Escandinávia, o Vidoeiro e a madeiras de Abeto vermelho são os recursos mais utilizados [20], enquanto que no sul da Europa o Pinheiro, Eucalipto, Sobreiro e Azinheira constituem os recursos lenhosos mais representativos da floresta portuguesa [8].

1.3.2 EQUIPAMENTOS DE COMBUSTÃO RESIDENCIAL

No que diz respeito aos sistemas de aquecimento residencial de pequena escala é essencial desenvolver sistemas de queima de biomassa que operem sob condições adequadas, de modo a promover a redução das emissões de poluentes gerados pela combustão de biomassa e a maximizar o aproveitamento de energia.

De entre as tecnologias de combustão de biomassa mais eficientes e limpas do ponto de vista ambiental, utilizadas no aquecimento residencial de espaços, encontram-se os fogões e as caldeiras a madeira e a pellets.

- Caldeiras de combustão de madeira: Sistema de aquecimento contínuo, que pode recorrer a um sistema de controlo automático e à convecção forçada para distribuição de calor. Estes sistemas contemplam um tanque para a acumulação do calor produzido no processo de combustão de biomassa e um sistema de combustão de biomassa faseada com injeção de ar secundário.

- Caldeiras a pellets: Sistemas de combustão de biomassa de pequenas dimensões e com propriedades constantes, geralmente estes equipamentos dispõem de um sistema automático de alimentação em contínuo, que garante uma melhor combustão (Figura 1-5). Um sistema de controlo deve ser utilizado para otimizar o processo, evitando a combustão incompleta, principalmente durante a ignição e extinção da combustão.



Legenda

- | | |
|---|----------------------------|
| 1 | Injecção de ar primário. |
| 2 | Injecção de ar secundário. |
-

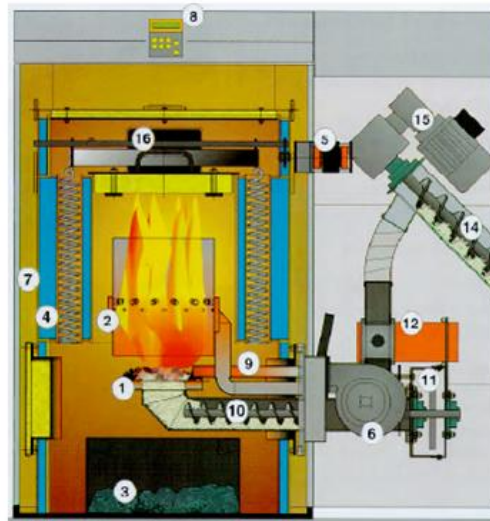


Figura 1-5 Amostra de biomassa pellets (esquerda) e caldeira a pellets com sistema mecânico automático de injeção de ar (direita) [4].

- Fogões a madeira: Sistema descontínuo de produção de calor, com um *design* da câmara de combustão otimizado, sendo este processo controlado pela temperatura de chama e pelo ar de combustão que deverá encontrar-se bem misturado com os gases resultantes da queima. Nestes sistemas procura-se evitar condições de combustão incompleta.

As caldeiras a pellets têm a vantagem de poder operar em contínuo, no caso de se utilizar um sistema automático de abastecimento de pellets. Por outro lado, os fogões a madeira são sistemas intermitentes de produção de calor, pois funcionam segundo ciclos de combustão, devido ao abastecimento manual do sistema. Apesar desta desvantagem, os fogões a lenha continuam a ser bastante utilizados para o aquecimento residencial, devido à disponibilidade e facilidade de utilização de madeira disponível. Mais ainda, as sensações proporcionadas aos utilizadores de fogões a lenha, em termos de conforto

térmico e de estética numa sala-de-estar, podem também justificar que se continue a utilizar sistemas deste tipo, principalmente em zonas rurais, sem acesso a sistemas de *district heating* ou outras fontes de energia renováveis.

1.3.3 FOGÕES A BIOMASSA E CERTIFICAÇÃO

A nível europeu, existem diversas normas que estabelecem requisitos para parâmetros de operação da combustão residencial em fogões a biomassa – lareiras, fogões em ferro fundido ou aço e fogões de massa térmica (*Mansory stoves*). A certificação é realizada em laboratórios de testes, implementados para o efeito, onde se garantem as condições de operação pré-definidas pelas normas de certificação estabelecidas em cada país. Na Europa, os fogões a biomassa são certificados segundo as normas EN-13240 (*room heaters*) ou EN-13229 (*insert appliances and open fire places*).

Na Dinamarca, existem diversos fabricantes de fogões (recuperadores de calor) em ferro fundido, que são objecto de testes de laboratório de certificação do tipo *Swan* [21]. Este sistema de certificação estabelece requisitos mais exigentes em termos da eficiência energética, sustentabilidade ambiental e limites de emissões de compostos poluentes. A certificação *Swan* está associada ao *Nordic Labelling*, sendo aplicada na Escandinávia por vários fabricantes de fogões a biomassa comercializados nos países nórdicos [21].

Em Portugal, o Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica (CATIM) realiza testes no âmbito da norma europeia para este tipo de equipamentos.

Alguns fabricantes de fogões a biomassa têm laboratórios de teste integrados nas suas instalações (Figura 1-6), onde monitorizam os parâmetros operacionais dos equipamentos e realizam testes de segurança, segundo as normas acima indicadas.

Os laboratórios de teste de fogões a biomassa contemplam uma instalação de controlo de variáveis operatórias, como a temperatura em diversos pontos dos equipamentos, concentração dos gases de exaustão maioritários, o diferencial de pressão na chaminé, entre outros. Os ensaios realizados em fogões (recuperadores de calor) têm normalmente a duração de 50 minutos com consumos de biomassa que variam entre os 1,6 – 2,5 kg h⁻¹.



Figura 1-6 Laboratório de ensaios da empresa de fabrico de fogões a biomassa HWAM – Dinamarca.

Na Tabela 1.2 são apresentadas algumas características gerais de fogões a biomassa comercializados na Dinamarca e em Portugal [21;22].

A maioria dos equipamentos para aquecimento de espaços, comercializados no mercado Dinamarquês e Português, revela eficiências térmicas globais superiores a 70%. A *Solzaima* por exemplo fabrica fogões a biomassa (recuperadores de calor) que transferem calor por convecção forçada, com potências nominais superiores a 5 kW, com um consumo médio de biomassa de 2 kg h^{-1} .

Na Dinamarca, as salamandras são bastante utilizadas e possuem eficiências globais superiores a 75%, transferindo calor por convecção natural. O ar de combustão em alguns equipamentos pode ser proveniente do interior ou exterior do edifício.

Tabela 1-2 Características gerais de alguns fogões de combustão a lenha na Dinamarca e em Portugal [21;22].

Tecnologia	Tipo	Potência utilizada (kW)	Consumo de biomassa (kg/h)	Emissões de CO (13% O ₂) (%)	Eficiência global (%)
Hwam /DK	Recuperador de calor ^a	2 - 7	1,7 – 3,0	<0,2	80
Topas Rais / DK	Salamandra ^a	3 - 7	1,7 – 3,0	<0,2	77
Morsø 6140 /DK	Salamandra ^a	3 - 6	1,7 – 3,0	<0,2	> 75
Solzaima Vénus/PT	Recuperador de calor ^b	14,0	2,3 – 4,7	0,53	> 70
Solzaima Slim Box /PT	Salamandra ^b	7 - 13	1,7 – 3,1	0,26	>70

^a certificação SWAN

^b certificação Europeia EN-13240 ou EN-13229

1.3.4 QUALIDADE DO AR

É reconhecido que, a combustão de biomassa em habitações residenciais é uma fonte importante de emissão de diversos gases poluentes, nomeadamente CO₂, CO, NO_x, SO₂, Compostos Orgânicos Voláteis (COVs), partículas, entre outros [23]. Em condições de combustão incompleta, pode ser emitida elevada quantidade de inqueimados, nomeadamente CO, fuligem, compostos orgânicos condensáveis e Hidrocarbonetos Aromáticos (PAH).

É reconhecido que, efeitos adversos na saúde humana são causados pela exposição ao fumo proveniente da combustão de biomassa, nomeadamente doenças como a asma ou problemas cardiovasculares em adultos e crianças, podem estar associados à matéria particulada.

Recentemente, investigações realizadas pelo *National Environmental Research Institute – Århus University* (NERI) revelaram que, em áreas com elevada densidade de fogões a biomassa, a contribuição da combustão doméstica em termos de emissão de partículas finas é de aproximadamente 2 µgm⁻³ (média anual), considerando as condições meteorológicas normais. As emissões de partículas provocadas pela elevada utilização

destes sistemas em zonas rurais representam entre 10-20% da poluição causada por aerossóis (médias anuais) [24].

Tabela 1-3 Factores de emissão de PM_{2.5}, CO e COVs totais para a combustão residencial de biomassa em recuperadores de calor modernos.

País	Portugal / Solzaima [8]	Dinamarca [25]	Finlândia [25]	Canadá [26]
PM _{2.5} g/kg	3 - 25	2,8	4,9	-
CO g/kg	43 - 149	-	-	70
COVs g/kg	-	-	-	7

Para além de afectar a qualidade do ar exterior, a combustão doméstica poderá ter efeitos adversos na qualidade do ar interior (QAI), dependendo das condições de utilização dos sistemas de aquecimento a biomassa.

De uma forma geral, a poluição do ar interior é um problema complexo que pode ser analisado com base na quantificação de diversas substâncias poluentes, associadas a diversas fontes emissoras, com efeitos distintos para a saúde. Os impactos da combustão residencial de fogões de sala a biomassa devem considerar a natureza e fontes de emissão de gases poluentes como o CO, CO₂ e COVs e a matéria particulada.

- Monóxido de Carbono (CO)

Gás inalável com cor, sabor e cheiro. No organismo humano, este gás reage com a hemoglobina para formar Carboxi-Hemoglobina (COHb). O monóxido de carbono é 200 vezes mais eficiente a combinar-se com a hemoglobina, quando comparado com o oxigénio (O₂). Desta forma, a quantidade de O₂ transportada para as células, na presença de elevadas concentrações de CO, é reduzida substancialmente, dependendo da concentração de CO presente na atmosfera. Mais ainda, o tempo de vida do CO no organismo é longo, afectando consideravelmente a saúde humana. A exposição ao CO causa dores de cabeça, náuseas, fadiga, tonturas e inconsciência, dependendo do nível de exposição a este gás poluente.

Este poluente pode resultar da combustão residencial de biomassa, constituindo os

fogões de cozinha e os sistemas de aquecimento a biomassa importantes fontes emissoras de CO. O fumo do tabaco é também uma importante fonte de CO. Verificam-se elevadas concentrações deste composto químico em espaços com fracas condições de ventilação [27].

- **Dióxido de Carbono (CO₂)**

Gás inalável, asfixiante, com cor e cheiro, que pode provocar problemas respiratórios e gastrointestinais, mudanças no pH do sangue, bem como cansaço físico que se pode fazer sentir ao realizar tarefas mais exigentes.

Representa o principal produto da combustão doméstica de combustíveis, nomeadamente no que diz respeito ao uso doméstico de energia para aquecimento e para cozinhar. A combustão de gás utilizado para consumo doméstico (eg. Butano), o querosene ou a biomassa, emitem quantidades significativas de CO₂. A actividade metabólica do organismo humano tem como consequência o consumo de oxigénio (O₂) e a emissão para a atmosfera de dióxido de carbono (CO₂), sendo que a sobre ocupação dos ambientes interiores pode provocar um aumento significativo das concentrações deste gás [27].

- **Compostos Orgânicos Voláteis (COV's)**

Compostos orgânicos definidos por terem ponto de ebulição entre os 50°C e os 260°C, sendo que os valores mais altos são relativos aos compostos polares.

Os COV's são substâncias que podem ser narcóticas e cancerígenas, e que provocam a depressão do sistema nervoso central. Podem também causar dores de cabeça, cansaço, arritmia cardíaca, irritação dos olhos, da pele e do sistema respiratório, bem como problemas em órgãos vitais como o fígado e os rins [28].

O ar exterior, a presença humana e as suas actividades, bem como os materiais e equipamentos existentes em ambientes interiores são fontes de COV's. Deficientes condições de ventilação permitem a migração de COV's emitidos em processos industriais ou compostos provenientes do solo, nomeadamente em regiões próximas de locais onde existam resíduos e em campos agrícolas onde se utilizam pesticidas. A água para consumo humano contaminada também pode conter este tipo de compostos. Por outro lado, são também fontes de COV's, o organismo humano, o transporte automóvel, a combustão residencial de biomassa e alguns produtos de limpeza e mobiliário, entre

outras fontes. Determinados materiais de construção de edifícios são responsáveis pela emissão contínua deste poluente.

A emissão de COV's pode ter como consequência a irritação das membranas mucosas e causar problemas ao nível da memória [27].

- **Partículas em suspensão (PM₁₀)**

As partículas PM₁₀ são constituídas por uma mistura complexa de substâncias orgânicas e inorgânicas com diâmetro aerodinâmico equivalente menor ou igual a 10 µm, que penetram no sistema respiratório até ao tórax [27].

Em ambientes interiores, as principais fontes emissoras de partículas são os processos de combustão, o fumo do tabaco e o exterior (ex.: *spray* marinho, tempestades no deserto, entre outros fenómenos).

No que diz respeito aos efeitos na saúde, a inalação de partículas em suspensão pode provocar problemas respiratórios, nomeadamente asma e bronquite.

- **Partículas finas (PM_{2.5}) e ultra-finas**

As partículas finas PM_{2.5}, com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 2,5 µm, contêm aerossóis formados secundariamente (conversão gás – partícula), partículas de combustão e vapores orgânicos e de metais. A fracção respirável de partículas contêm hidrocarbonetos aromáticos poli nucleares (PAH) que são particularmente importantes devido ao seu potencial cancerígeno, resultando estes de processos de combustão incompleta e do fumo do tabaco [27].

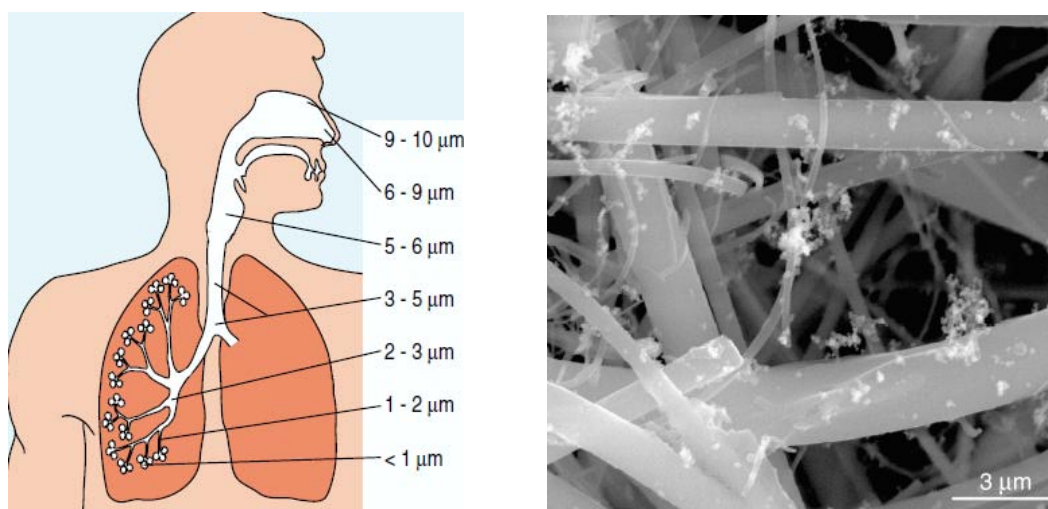


Figura 1-7 Partículas resultantes da combustão de biomassa [29].

Por outro lado, as partículas com diâmetro equivalente inferior a 1 μm – partículas ultra finas podem penetrar até à região dos alvéolos pulmonares, sendo consideradas como as mais perigosas para o organismo humano. Estas partículas encontram-se associadas a processos de combustão, nomeadamente a emissões resultantes da queima de gasolina e *diesel* em automóveis, à combustão residencial de biomassa e ao fumo do tabaco. Apesar de reconhecidas como problemáticas para a saúde humana, o conhecimento acerca das propriedades físicas, químicas e ao nível da distribuição espacial e temporal para estas partículas mais pequenas é ainda limitado [4;30].

A poluição do ar interior pode, por um lado, ser gerada e transportada do exterior para o interior de habitações localizadas em regiões onde se verificam elevados níveis de concentração de substâncias poluentes da qualidade do ar, podendo por outro lado, ocorrer devido à geração de compostos poluentes no interior dos edifícios, causada por actividades decorrentes no seu interior [31]

Factores como a taxa de renovação de ar novo, transporte de poluentes do exterior para o interior, e os processos físicos de deposição e ressuspensão de poluentes que ocorrem em ambientes interiores devem ser tidos em consideração na análise da QAI em edifícios [32].

A razão de concentrações de gases ou partículas entre o interior e exterior da residência constitui um importante parâmetro nesta análise.

1.3.4.1 Transporte Exterior-Interior

Fontes de emissão de poluentes localizadas próximo da zona residencial em estudo podem afectar a QAI das habitações no local. Poluentes emitidos por automóveis, pela indústria, ou até mesmo provenientes da queima de biomassa a nível doméstico podem, em alguns casos, constituir a principal causa de contaminação dos ambientes interiores. Para avaliar melhor as causas e origem da poluição do ar interior criaram-se conceitos e ferramentas de análise.

Os rácios entre a concentração de partículas no interior e exterior permitem-nos estimar a contribuição da poluição exterior na contaminação dos ambientes interiores. A tabela que se segue retrata rácios típicos de concentração interior – exterior (I/O) em duas regiões da Europa.

Tabela 1-4 Rácios da concentração de poluentes entre o interior e o exterior (média 24h) no inverno para o norte e sul da Europa.

Parâmetro / região	Sul da Europa	Norte da Europa	Actividades no interior
PM ₁₀ [12]	-	0,65	2,00
PM _{2,5} [12;32]	-	0,48-0,70	1,60
Partículas ultra-finas [33]	-	0,50 – 0.80	-
CO [34]	0.57 – 0.82	-	0.57 – 0.82

Da observação da tabela 1-4 podemos verificar que, quando decorrem actividades no interior dos edifícios os rácios de concentração (interior/exterior) são superiores a 1.

Encontraram-se poucas referências relativas a estes rácios de concentração para o sul da Europa. No entanto, considera-se que, para as zonas urbanas, os valores apresentados na tabela 1-4 para o norte da Europa podem ser representativos dos rácios de concentração I/O para o sul da Europa.

1.3.4.2 Actividades dos ocupantes

Na análise da QAI é fundamental descrever as actividades que decorrem no interior do edifício, rotinas de ocupação de espaços, utilização de equipamentos e hábitos dos moradores ou visitantes. Estas actividades podem decorrer de forma rotineira ou esporádica, como por exemplo aquando da confecção de alimentos ou durante a geração de fumo pelo tabaco num dia de festa, respectivamente. Tais como as fontes poluentes apresentadas anteriormente, em condições de combustão incompleta e/ou sob condições de operação inadequadas, os fogões a biomassa para aquecimento doméstico podem provocar um aumento da concentração de aerossóis e substâncias poluentes nos ambientes interiores onde são utilizados. A utilização de modelos numéricos de simulação da qualidade do ar interior permite-nos prever o nível de concentração de poluentes presentes em ambientes interiores sob determinadas condições de ventilação.

No Reino Unido, foi desenvolvido por Dimitroulopoulou C. e al. (2006) um modelo matemático numérico (INDAIR) que prevê a concentração de diversos poluentes no interior de edifícios residenciais para diversos cenários de emissão. As previsões efectuadas pelo modelo numérico foram coerentes com medições realizadas em habitações no Reino Unido.

As concentrações simuladas para diferentes poluentes são função das características de diferentes habitações, das condições ambientais e das taxas de emissão de contaminantes no exterior e interior desses reservatórios, das suas taxas de renovação de ar e de deposição de partículas, entre outros parâmetros.

Ao simular cenários distintos de actividades no interior, mais concretamente para um cenário sem actividades decorrentes no interior, cenário com a presença de fumo do tabaco e cenário de confecção de alimentos com fogão a gás, podemos ter uma ideia das gamas de concentração de partículas e CO durante o inverno numa zona urbana localizada no Reino Unido, para cada uma das situações. A taxa de renovação de ar média aplicada neste caso é de $0,7 \text{ h}^{-1}$. Por outro lado, as taxas de emissão relativas às principais fontes emissoras dos poluentes em análise neste modelo numérico foram baseadas em funções de probabilidade, relativas a dados experimentais para o Reino Unido. Os valores médios apresentados dizem respeito à concentração média de partículas para o período de 24 horas e à concentração média de CO para o período de 8 horas. Os valores máximos dizem respeito à concentração média dos poluentes para o período de 1 hora [32].

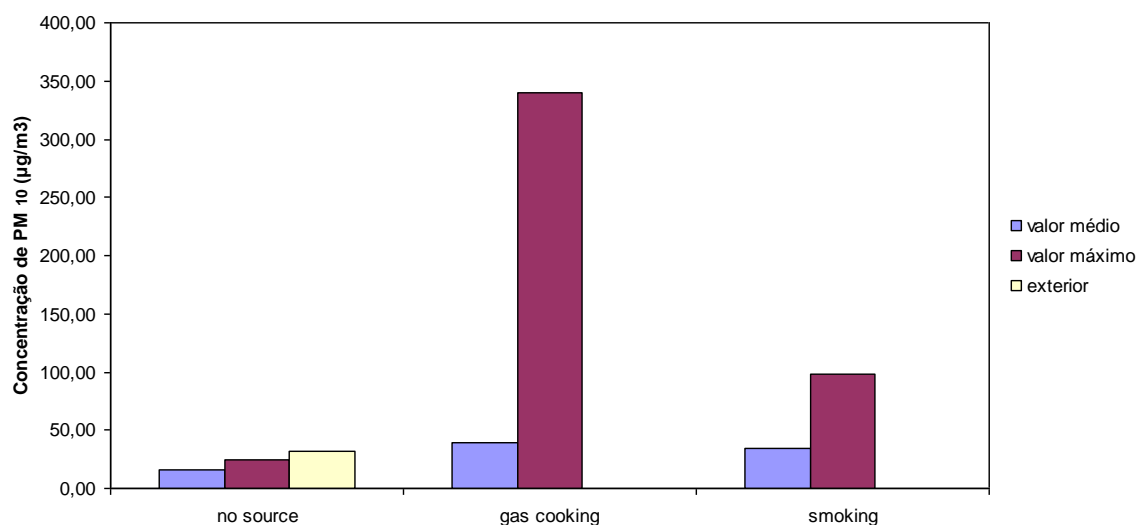


Figura 1-8 Concentração de PM₁₀ numa habitação localizada numa zona urbana no Reino Unido, para 3 cenários distintos de actividades decorridas no interior de uma habitação tipo [32].

Pode verificar-se que, os fogões de cozinha a gás emitem quantidades de partículas PM_{10} que podem ultrapassar os $300 \mu g m^{-3}$ – valor médio para períodos de 1 hora.

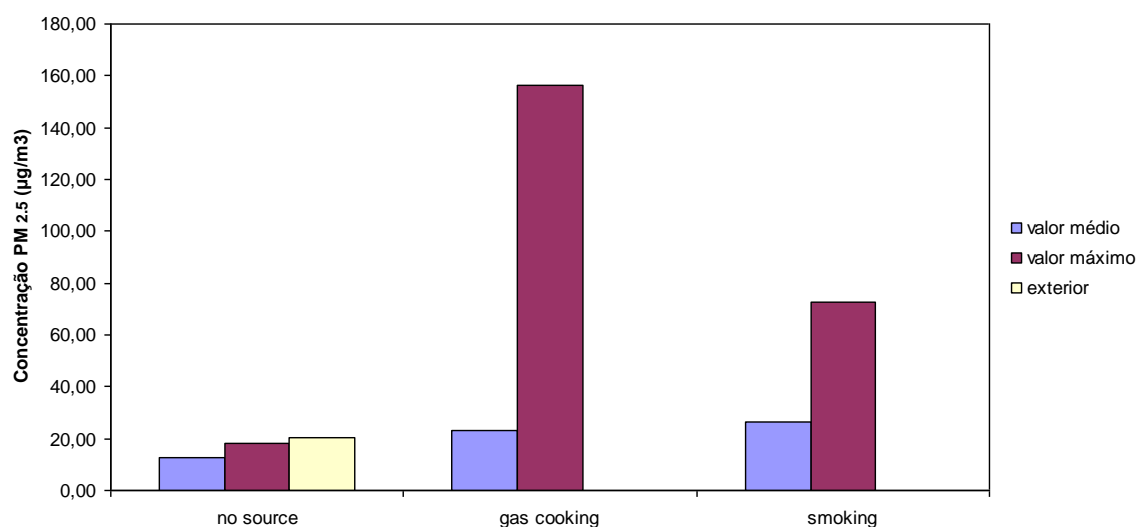


Figura 1-9 Concentração de $PM_{2.5}$ numa habitação localizada numa zona urbana no Reino Unido, para 3 cenários distintos de actividades decorridas no interior de uma habitação tipo [32].

Relativamente às concentrações de $PM_{2.5}$, continuam a ser os fogões de cozinha a gás a emitir maiores quantidades de partículas $PM_{2.5}$, que podem ultrapassar os $140 \mu g m^{-3}$ médias de 1 hora.

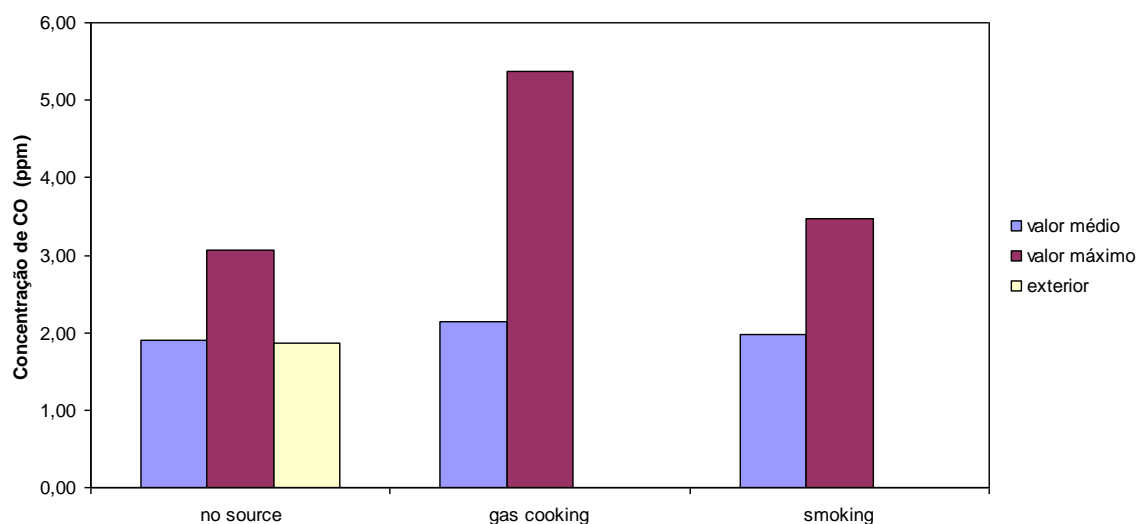


Figura 1-10 Concentração de CO numa habitação localizada numa zona urbana no Reino Unido, para 3 cenários distintos de actividades decorridas no interior de uma habitação tipo [32].

Por sua vez, verifica-se que, os fogões a gás natural não contribuem de forma significativa para a geração de elevadas concentrações de CO, sendo que, para o cenário representativo da utilização de fogões a gás o valor máximo de concentrações de CO (média de 1 hora) no ar ambiente não excede os 6 ppm.

É importante ter em conta que, os resultados obtidos nas simulações apresentadas não são directamente comparáveis com os resultados das medições realizadas no âmbito deste estudo, na medida em que estamos a analisar processos de combustão distintos. No entanto, esta análise permite-nos compreender melhor como poderá variar a carga poluente no interior de um edifício para diversos cenários de emissão.

1.3.5 VALORES-GUIA PARA A QAI

A Organização Mundial de Saúde (OMS) ainda não publicou *Guidelines* específicas para a QAI. No entanto, foi publicada em 2002 a 2ª edição das “Air Quality Guidelines”, que estabelecem valores guia para uma lista de 35 poluentes do ar exterior e interior. Na tabela 1-5 apresentam-se os valores relativos às concentrações máximas de referência especificadas no RSECE e os valores guia estabelecidos pela OMS.

Tabela 1-5 Concentrações máximas de referência estabelecidas pelo Decreto-Lei 79/2006 [18] vs. Valores guia estabelecidos pela OMS [35].

Composto	Concentração máxima de referência (mg/m ³) RSECE	Valores Guia (mg/m ³) OMS
PM ₁₀	0,15	0,02 (1 ano) 0,05 (24 horas) 100 (15 minutos)
CO	12,5	60 (30 min.) 30 (1 hora) 10 (8 horas)
CO ₂	1800	-
COV's totais	0,6 (0,16 ppm Tolueno)	-
Formaldeído	0,1	0,1 (30 min.)
Bactérias	500 UFC/m ³ ar	500 UFC/m ³ ar
Fungos	500 UFC/m ³ ar	500 UFC/m ³ ar
Legionella	100 UFC/m ³ água	-

1.3.6 BOAS PRÁTICAS DE UTILIZAÇÃO DOS FOGÕES A BIOMASSA

As boas práticas de utilização de fogões a biomassa em habitações são fundamentais para maximizar a eficiência energética ao nível do aquecimento residencial e reduzir os seus impactos na qualidade do ar interior. Investigadores alemães, nomeadamente Nussbaumer, T. et al. (2008), concluíram que, as emissões resultantes da queima de madeira em fogões dependem bastante das propriedades da biomassa utilizada e do modo de ignição dos fogões a biomassa. Verificou-se que, quando se inicia a combustão pelo topo da madeira (Figura 1-11) evita-se a emissão de cerca de 50-80% das partículas inaláveis, relativamente à técnica de ignição comum – ignição por de baixo da lenha [36].

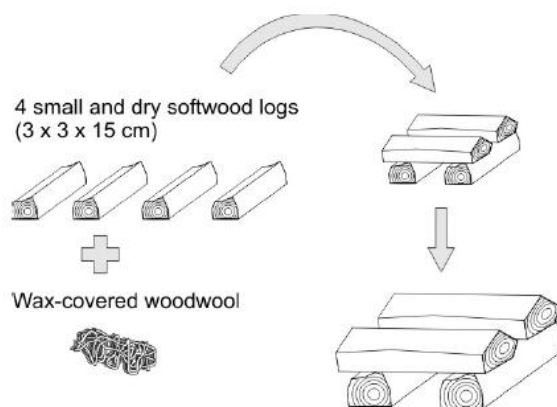


Figura 1-11 Ilustração do módulo de construção de biomassa para aplicação da técnica de ignição pelo topo [36].

Os investigadores do NERI na Dinamarca demonstraram que, os hábitos de utilização dos fogões a biomassa podem afectar consideravelmente o nível de emissão de partículas. A utilização de fogões (recuperadores de calor) mais antigos e a combustão de biomassa húmida pode causar um aumento do nível de emissões deste composto poluente (10-100 vezes relativamente à situação em que não se utilizam fogões a biomassa) [24].

O controlo das condições de combustão pode contribuir para uma melhoria da performance energética e ambiental dos fogões a biomassa. Uma das principais medidas a implementar na optimização de recuperadores de calor está relacionada com a injeção de ar de combustão em vários estágios e com a manutenção da temperatura de chama adequada [4;37].

2 TRABALHO EXPERIMENTAL

Este trabalho foi desenvolvido segundo dois níveis de análise, nomeadamente i) o estudo integrado de um edifício residencial e seus sistemas energéticos e ii) a análise mais detalhada de um fogão a biomassa para aquecimento doméstico.

Para prever os consumos energéticos e a temperatura no interior de moradias unifamiliares utilizou-se um *software* de simulação térmica e dinâmica para o efeito. Esta ferramenta possibilitou a análise integrada da operação de diversos tipos de fogões a biomassa em residências representativas de habitações unifamiliares, respectivamente, com isolamento e sem isolamento térmico existentes na Dinamarca. Para complementar este caso de estudo, foram efectuadas medições de temperatura e humidade relativa no interior e exterior de habitações com características semelhantes às consideradas no modelo de simulação energética. Com o objectivo de saber mais acerca das rotinas e hábitos dos ocupantes dos espaços em análise, efectuaram-se questionários aos proprietários das habitações. Em paralelo, efectuaram-se medições de qualidade do ar, no exterior e interior dos referidos reservatórios, antes, durante e após a utilização dos recuperadores de calor a biomassa.

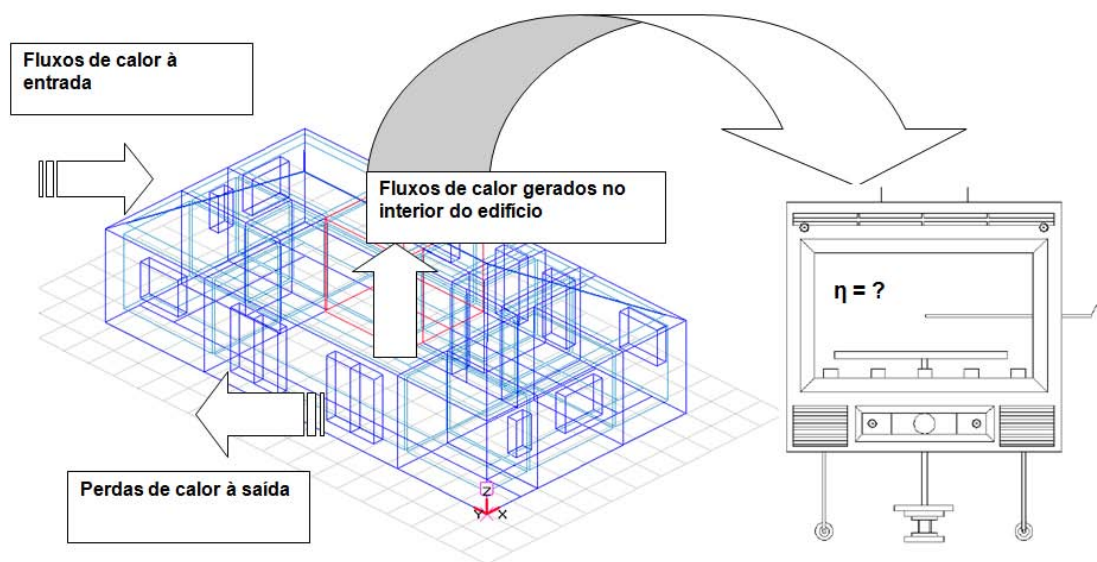


Figura 2-1 Esquema sobre a metodologia de análise energética seguida no trabalho experimental realizado na Dinamarca e em Portugal.

A análise do desempenho energético de fogões a biomassa em edifícios requer um conhecimento dos processos de combustão e transferência de calor envolvidos. Para

além da caracterização de fogões a biomassa certificados existentes no mercado Dinamarquês e Português, realizaram-se medições dos seus parâmetros de operação mais importantes numa instalação experimental implementada para o efeito. Calculou-se a eficiência térmica (η) do fogão típico Português para as suas condições típicas de operação.

2.1 ANÁLISE DE ENERGÉTICA E QAI EM HABITAÇÕES - DINAMARCA

Neste caso de estudo pretende-se analisar a operação de diferentes fogões a biomassa em dois tipos de construções representativas de habitações modernas (elevada classe energética) e antigas (menor eficiência térmica), com vista à análise de hábitos e comportamento dos seus ocupantes, durante 3 meses da estação de aquecimento – representativos do período mais frio (Janeiro-Fevereiro) e mais quente da estação de aquecimento (Abril).



**Menor eficiência
térmica**



A

Figura 2-2 Tipologias de habitação Dinamarquesa unifamiliar. Habitação construída na década de 80 em *Espegaerde* (esquerda) e habitação construída no ano 2008 em *Esrum* (direita).

De entre os sistemas de aquecimento analisados neste estudo encontram-se os fogões de ferro fundido a madeira, que distribuem o calor pelas habitações por convecção natural (potência máxima transferida para o ambiente ($P_{\text{máx.}}$) entre 5.0 - 10 kW; eficiência térmica (η) ~ 80%) e os *Mansory stoves* ($P_{\text{máx}} \sim 2 \text{ kWth}$ and $\eta \sim 85 \%$).

Os fogões de ferro fundido considerados neste estudo são certificados pela norma europeia EN 13240:2003, sendo a duração média dos seus ciclos de combustão de 50 minutos, aquando da sua utilização segundo as condições óptimas de operação.

Por outro lado, os fogões de massa térmica, normalmente construídos em tijolo (*Masonry stoves*) apresentam ciclos de combustão mais longos, que podem chegar a 10 horas para as condições óptimas de operação.



Figura 2-3 Fogão de aquecimento doméstico a biomassa “Morsø 7648 Pedestal” – Certificado SWAN [38].

Na Figura 2-3 à esquerda é possível observar o percurso do ar de combustão secundário (a vermelho a seta descendente) num fogão da marca Morsø, responsável pela queima de gases voláteis, bem como o percurso do ar de ventilação natural, utilizado para promover os fluxos de calor por convecção natural para o espaço em aquecimento (a cor de rosa).

Na Tabela 2-1 são apresentados os resultados de uma experiência realizada pelo Instituto Tecnológico da Dinamarca (TI) numa habitação unifamiliar, onde se quantificaram os fluxos de calor emitidos por um fogão de ferro fundido e as temperaturas no interior de um edifício ao longo do processo de combustão de biomassa. Neste ensaio foi utilizado um fogão de ferro fundido da marca Morsø e biomassa com um Poder Calorífico Inferior (PCI) de 4,2 kW/kg. Mais ainda, considerou-se a humidade de biomassa igual a 15%.

Tabela 2-1 Características da experiência realizada pelo Instituto Tecnológico (TI) numa casa unifamiliar em Outubro de 2009, durante a utilização de um fogão Morsø de ferro fundido.

Hora / parâmetro	Massa de fuel (kg)	Potência Ambiente (kWth)	Temperatura T_1^a (°C)
18:00 – 19:00	2,688	6,2	23,7
19:00 – 20:00	2,656	6,2	24,7
20:00 – 21:00	2,507	5,8	25,3
21:00 – 22:00	2,445	5,7	25,8
22:00 – 23:00	2,411	5,6	26,4

^a T_1 Temperatura ambiente num ponto próximo do fogão a biomassa.

Verificou-se que a temperatura média no interior da habitação em estudo (ponto de medição localizado no centro do espaço em aquecimento) varia entre os 23.7 – 26.4 °C ao longo do fim da tarde, durante 5 ciclos de combustão. É de referir que a potência térmica fornecida ao espaço climatizado varia entre os 5.6 - 6.2 °C. Cada ciclo de combustão tem duração aproximada de 1 hora, sendo que o consumo de biomassa variou entre os 2.4 - 2.7 kg h⁻¹.

Por sua vez, os fogões *Mansory* encontram-se integrados no edifício, sendo constituídos por materiais com elevada inércia térmica, que permitem conservar o calor gerado durante a queima de biomassa. O excesso de calor acumulado será libertado progressivamente ao longo do dia por efeito de convecção e radiação através das paredes e janelas destas construções.

O desenvolvimento do caso de estudo na Dinamarca foi baseado em informação disponibilizada pelo Instituto Tecnológico da Dinamarca e fabricantes e construtores dos sistemas de aquecimento a biomassa em estudo. Foi com base nos recursos disponibilizados que se correu o programa de simulação dinâmica para diferentes cenários de utilização de fogões a biomassa em habitações, com o objectivo de determinar os consumos de energia final para aquecimento de espaços e as temperaturas na principal zona térmica em aquecimento.

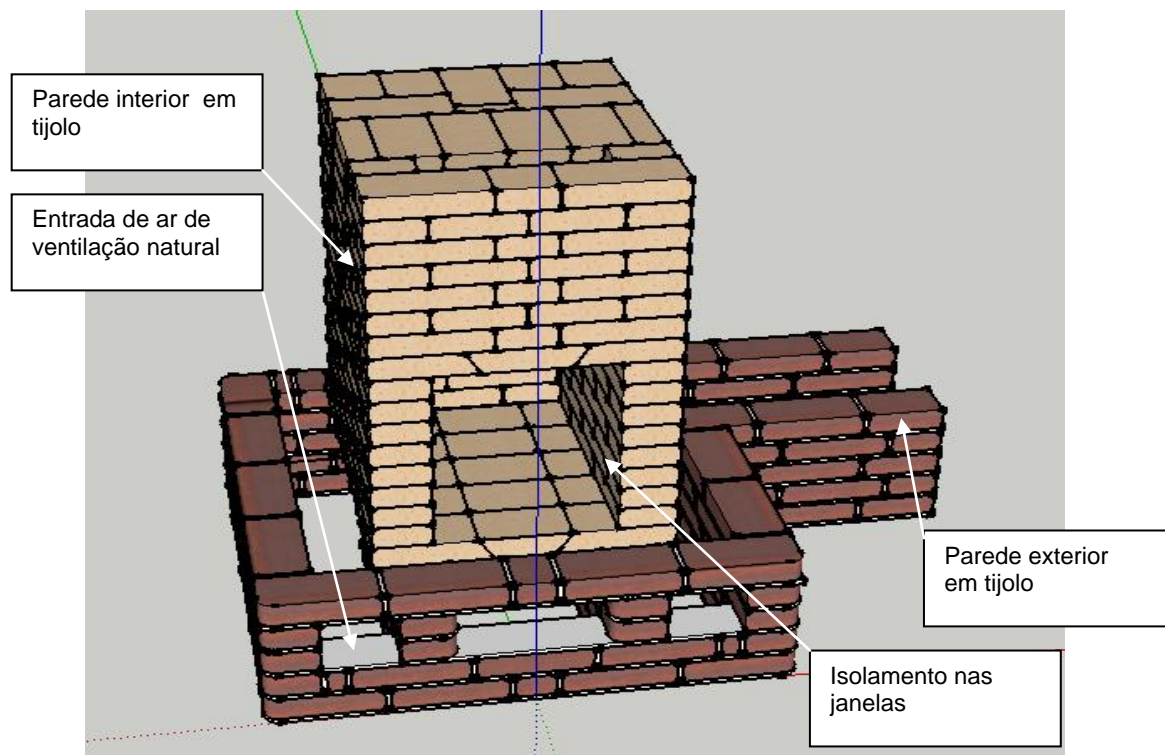


Figura 2-4 Modelo de um fogão *Mansory* - corte lateral [39].

2.1.1 SIMULAÇÕES ENERGÉTICAS EM HABITAÇÕES

Para simular os consumos de energia final para aquecimento de espaços e prever as respectivas condições de conforto térmico, associadas às simulações realizadas no âmbito do caso de estudo em análise, utilizou-se o software de simulação energética para edifícios, designado *BSIM – Building Simulation*, desenvolvido pelo *Danish Building Research Institute (SBI) – Aalborg University*.

O desenvolvimento de um modelo de construção de uma habitação unifamiliar, onde é possível integrar diversos tipos de equipamentos, nomeadamente diferentes tipos de recuperadores de calor a biomassa constitui a primeira tarefa no processo de aplicação deste *software*.

Após a construção de um modelo geométrico de base, seguiu-se a integração dos dados climáticos da região onde se desenvolveu o caso de estudo, nomeadamente para a área metropolitana de Copenhaga. O modelo de base desenvolvido integra os dados climáticos da região da capital Dinamarquesa, para um ano meteorológico típico dentro do período entre 2000-2009 (*Typical Reference Year*).

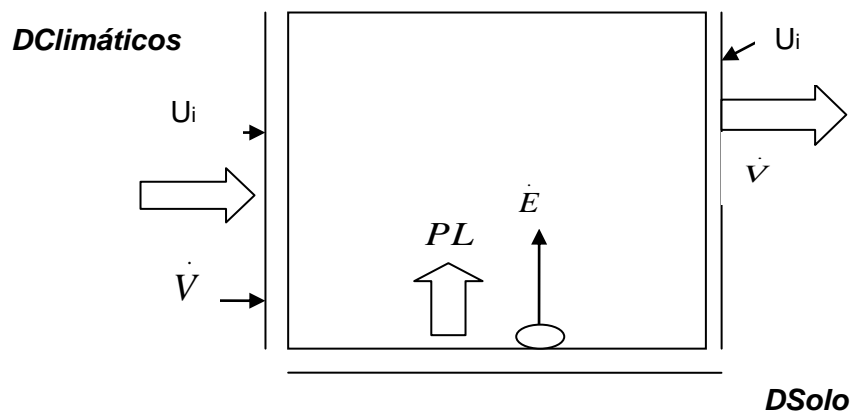


Figura 2-5 Esquema do balanço energético ao reservatório climatizado e ventilado.

Por outro lado, o *BSIM – Building Simulation* permite a representação de diversos sistemas energéticos e cargas térmicas existentes nas construções projectadas. Considerando as condições de funcionamento das habitações familiares na Dinamarca, introduziram-se os diagramas de carga para cada uma das cargas térmicas e sistemas energéticos aplicados a este caso de estudo.

2.1.1.1 GEOMETRIA E ELEMENTOS DE CONSTRUÇÃO

A representação detalhada de um edifício referencial num programa de simulação dinâmica é uma tarefa complexa, pelo que neste estudo se optou por desenvolver um modelo geométrico de base que pudesse ser representativo de habitações modernas com elevada eficiência térmica e casas menos eficientes do ponto de vista térmico. Representaram-se moradias Dinamarquesas unifamiliares com e sem isolamento térmico.

Os dados necessários ao desenvolvimento de um modelo representativo da construção em estudo são: os reservatórios existentes e respectiva geometria (área de pavimento e pé direito), número de zonas térmicas existentes, representação de aberturas (portas e janelas) e elementos de construção (materiais de construção e a sua espessura).

Apenas com um piso ou dois, as moradias dinamarquesas modernas têm normalmente 7 compartimentos e soluções construtivas em cimento e tijolo com baixos coeficientes de transmissão térmica (U) e isolamentos térmicos de lã mineral com cerca de 100 mm de espessura.

Os edifícios residenciais representativos de construções da década de 80 são constituídos por paredes exteriores em cimento sem isolamento térmico, apresentando coeficientes de transmissão térmica mais elevados.

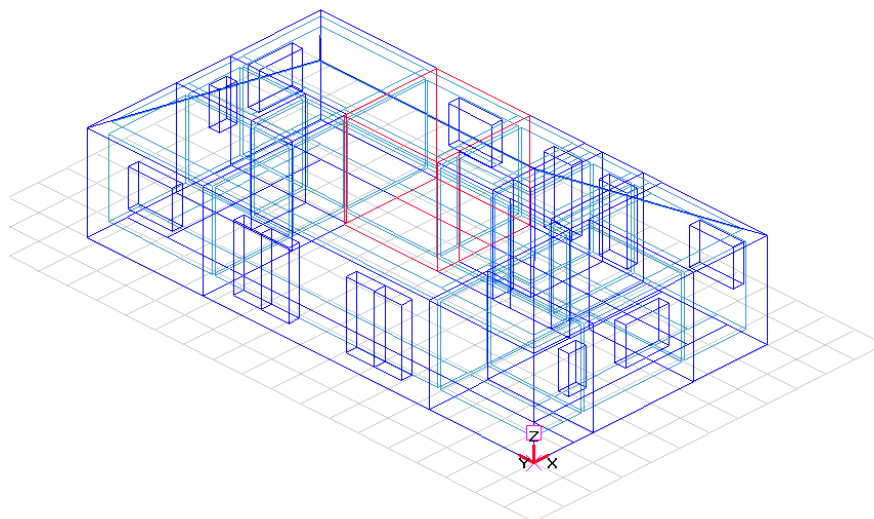


Figura 2-6 Representação do modelo de geometria utilizada para a simulação térmica e dinâmica.

As zonas térmicas representadas no modelo totalizam um volume exterior e interior de $470,4 \text{ m}^3$ e $323,5 \text{ m}^3$, respectivamente. A área total de pavimento é de aproximadamente 120 m^2 , sendo que a sala de estar onde se encontra o fogão a biomassa tem 36 m^2 . Os valores apresentados correspondem a valores médios utilizados pelo *Danish Building Research Institute* (SBI) em estudos anteriormente para edifícios deste tipo.

Para representar as habitações modernas típicas Dinamarquesas considerou-se que, as suas paredes exteriores são de cimento e tijolo e o seu isolamento térmico é em lã mineral, totalizando uma espessura de 358 mm e um $U=0,23 \text{ W / m}^2 \text{ K}$. No segundo caso, para representar as habitações mais antigas sem isolamento térmico admitiu-se que, o conjunto de elementos construtivos apresenta uma espessura de 200 mm e um $U=3,03 \text{ W/m}^2\text{K}$, com paredes em cimento e tijolo.

2.1.1.2 CARGAS TÉRMICAS

A carga térmica gerada pelos ocupantes do edifício e pelos equipamentos utilizados em cada uma das zonas térmicas, bem como as perdas de calor devido a infiltrações, ventilação natural e mecânica foram tomadas em linha de conta no caso de estudo base.

Após o desenvolvimento do modelo de base, representaram-se diferentes condições de utilização para diferentes sistemas de aquecimento a biomassa. Realizaram-se simulações para fogões a biomassa de ferro fundido e em tijolo de massa térmica, designados por *Mansory stoves*. Para o cenário de operação de um fogão de ferro fundido considerou-se a utilização de um sistema de aquecimento central convencional ou recorrendo a uma bomba de calor, sendo o calor distribuído por um sistema de piso radiante. As condições das simulações serão apresentadas mais adiante, tendo por base as características e as rotinas dos ocupantes das casas unifamiliares na Dinamarca.

Tabela 2-2 Características das cargas térmicas consideradas no modelo.

Cargas térmicas	Descrição geral	Perfil de utilização
Ventilação mecânica	Sistema integrado em 4 zonas térmicas	Todo o dia
Ventilação natural e infiltrações	Contabilizado para todo o edifício	Varia entre 40-100% da taxa de renovação de 0,4
Iluminação	Iluminação para um nível de 100 lux	Utilização de 8 a 16 horas por dia
Equipamentos	Computadores, electrodomésticos e recuperador de calor a biomassa ou fogão em tijolo	Entre 4 a 6 horas de utilização ou todo o dia para fogão em tijolo
Ocupação	3 adultos e uma criança	6 horas por dia

2.1.1.3 CARACTERÍSTICAS DAS SIMULAÇÕES

O *software* utilizado permite simular consumos energéticos e processos de transferência de calor associados aos referidos sistemas, assumindo-se os fogões a biomassa como um corpo negro que emite energia por radiação e convecção para a zona térmica em análise. Para representar os diferentes tipos de sistemas de aquecimento a biomassa elaboraram-se diferentes diagramas de carga para um ano de funcionamento da habitação de referência (modelo térmico de base). Os pressupostos para esta tarefa foram a potência emitida pelos fogões para cada hora de funcionamento, considerando a duração dos ciclos de combustão para os fogões de ferro fundido 1 hora. Para os fogões *Mansory*, consideraram-se os dados disponibilizados pelo Instituto Tecnológico da

Dinamarca para a potência de transferência de calor ao longo de um dia típico de inverno [39].

2.1.2 CASO DE ESTUDO EM HABITAÇÕES UNIFAMILIARES

Conforme foi referido, foram seleccionadas habitações representativas de moradias unifamiliares, localizadas na região de Copenhaga, onde se efectuaram medições de parâmetros de conforto térmico, taxas de renovação de ar de qualidade do ar. Foi realizado o balanço energético para cada uma das habitações através de informação disponibilizada pelos proprietários de cada uma das habitações. Informações relativas ao ano de 2009 sobre os consumos de energia primária, os hábitos de utilização dos sistemas energéticos em funcionamento em cada uma das habitações, bem como as características gerais de elementos de construção das habitações foram recolhidas. No capítulo 3, apresentar-se-ão as fórmulas utilizadas no cálculo dos consumos de energia final para cada uma das habitações em estudo.

2.1.3 MEDIÇÕES DE PARÂMETROS DE CONFORTO TÉRMICO E QAI

Com o objectivo de estudar os ambientes interiores de habitações unifamiliares na Dinamarca foram realizadas medições de temperatura, humidade relativa, CO, CO₂, COVs e partículas de diferentes granulometrias, em moradias localizadas na região metropolitana de Copenhaga, 5 das quais construídas entre 2000 e 2009. As campanhas de amostragem e medição foram efectuadas em dois períodos do ano, no Inverno e na Primavera, com o objectivo de se realizarem ensaios em dois períodos em que é comum utilizar fogões a biomassa, durante períodos com condições meteorológicas diferentes.

2.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DO FOGÃO A BIOMASSA - PORTUGAL

Após a análise do aquecimento doméstico a biomassa em residências Dinamarquesas, seguiu-se o estudo mais detalhado da eficiência térmica e de condições de operação do fogão a biomassa Português para aquecimento residencial de espaços. Para o efeito foi realizada a caracterização dos seus parâmetros de operação, a quantificação dos fluxos de calor e respectivas potências térmicas à entrada e saída do fogão.

Para proceder ao cálculo do balanço energético ao fogão realizaram-se medições de temperatura em vários pontos do fogão, bem como a outros parâmetros de operação associados à combustão de biomassa neste sistema de aquecimento, como por exemplo o caudal de ar de combustão e o consumo de combustível. As medições foram realizadas numa instalação de monitorização dos principais parâmetros de operação de um fogão da marca *Solzaima*, localizada no Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, tendo sido realizadas durante os meses de Abril e Maio de 2010. No capítulo 4 é apresentada a descrição detalhada relativa aos cálculos realizados, bem os resultados obtidos e a sua discussão.

2.2.1 INSTALAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO

As medições dos parâmetros necessários ao cálculo da eficiência térmica foram realizadas com o auxílio de uma instalação associada ao fogão a biomassa, através da integração de termopares, uma célula de carga, um sensor de fluxo mássico e um analisador de gases (ver Figura 4-1), com vista à realização de medições em contínuo dos referidos parâmetros operacionais.

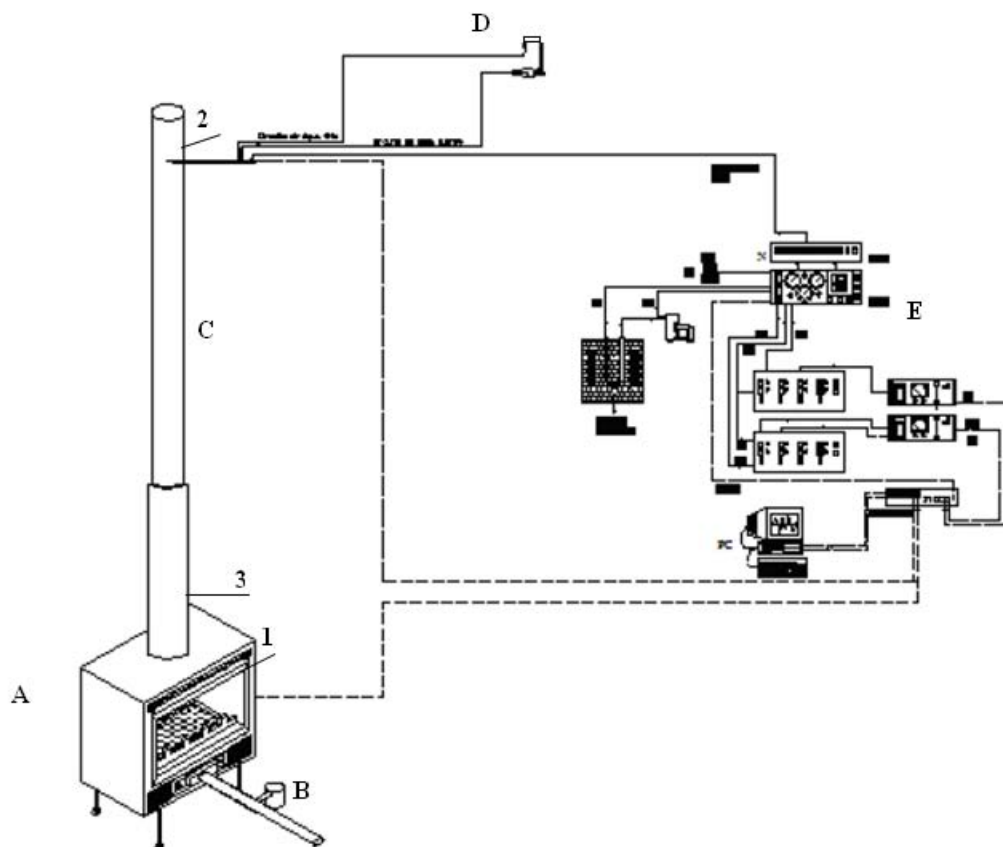
A monitorização do consumo de biomassa e do caudal de ar de combustão durante a operação do fogão é realizada através de uma célula de carga e de um sensor de fluxo mássico, respectivamente.

- DS Europe 535 QD – A5 (célula de carga);
- Kurz, series 155 – Mass Flow Computer (sensor de fluxo mássico).

O sistema de amostragem e análise da composição do efluente gasoso na chaminé (E) apresentado na Figura 4-1 é constituído pelos seguintes elementos:

- Termopares do tipo K (Ni-CrNi) – instalado no centro da câmara de combustão, à entrada e saída da chaminé.
- Sonda arrefecida para amostragem de gases, com filtro de partículas – instalado a 198 cm do topo da câmara de amostragem (à saída da chaminé).
- Um conjunto de unidades electropneumáticas de controlo da distribuição de gás amostra e de gás zero pelos analisadores.
- Um conjunto de unidades electrónicas para controlo do sistema e aquisição de dados.

- Analisador de O₂ paramagnético, Modelo ADC 02-700.
- Analisador de CO e CO₂ infravermelho não dispersivo.



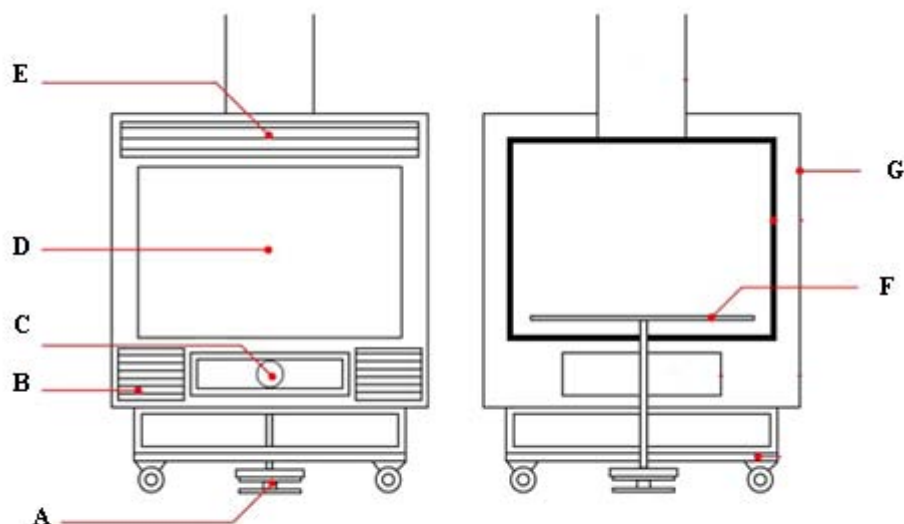
Legenda:

-
- | | |
|---------|--|
| A | Fogão a biomassa |
| B | Sensor de fluxo mássico para o ar de combustão |
| C | Chaminé |
| D | Sistema de refrigeração da sonda de amostragem de gases |
| E | Sistema de análise e aquisição de dados |
| 1, 2, 3 | Termopares na câmara de combustão e à entrada e saída da chaminé |

Figura 2-7 Instalação experimental para monitorização de parâmetros necessários ao cálculo de balanço energético do fogão a biomassa típico Português [8].

2.2.2 RECUPERADOR DE CALOR DA SOLZAIMA

As experiências de combustão foram realizadas num fogão da marca *Solzaima Zaima – modelo 124 A* de dimensões 690 x 440 x 763 mm, com a parede frontal em ferro fundido e as restantes paredes em aço inoxidável. Na Figura 4-2 apresenta-se o referido fogão a lenha e respectiva legenda [40].



Legenda:

-
- | | |
|---|---|
| A | Célula de carga |
| B | Conduta para circulação de ar de ventilação - entrada |
| C | Conduta para circulação de ar de combustão - entrada |
| D | Câmara de combustão |
| E | Conduta para circulação de ar de ventilação – saída |
| F | Grelha de suporte ao combustível sólido |
| G | Parede exterior em ferro fundido |
-

Figura 2-8 Fogão a biomassa do fabricante Solzaima [43].

2.2.3 *LOCAIS E PONTOS DE AMOSTRAGEM*

Foram realizadas medições de temperatura, consumo de combustível, caudal de ar de combustão e composição do gás de exaustão no fogão a biomassa. A temperatura foi monitorizada em diferentes localizações no fogão a biomassa: na zona de admissão do ar de combustão (laboratório), à entrada e saída da conduta do ar de ventilação (convecção forçada), nas paredes, na câmara de combustão, nos gases de exaustão (à entrada e saída da chaminé - a 2.98 m acima da câmara de combustão).

3 RESULTADOS DA ANÁLISE ENERGÉTICA E QAI EM HABITAÇÕES - DINAMARCA

Neste capítulo são apresentados os resultados mais representativos obtidos, relativos às simulações energéticas para a habitação unifamiliar Dinamarquesa, à análise de consumos de energia em habitações unifamiliares e às medições de parâmetros de conforto térmico e qualidade do ar interior efectuadas nas diversas habitações do caso de estudo para a Dinamarca.

3.1 SIMULAÇÕES ENERGÉTICAS

O método de simulação dinâmica aplicado constitui apenas uma primeira aproximação ao cálculo dos consumos de energia final para aquecimento de espaços e das temperaturas atingidas no interior das residências na Dinamarca.

No total, foram efectuadas 10 simulações térmicas e dinâmicas em edifícios com e sem isolamento térmico para o período de 1 ano, com o objectivo de comparar diferentes cenários de utilização de fogões: para a utilização de dois tipos de fogões de ferro fundido, para a utilização de dois tipos de fogões de massa térmica e em situações em que não se recorre ao aquecimento a biomassa. A tabela 3-1 resume o esquema de simulações realizadas no âmbito deste trabalho.

Tabela 3-1 Esquema das simulações térmicas realizadas no âmbito do trabalho.

Tipo de fogão / Habitação	moderna 2009	década de 80
Ferro fundido 5 kW	Piso radiante programado para a temperatura de 18 graus das 2 às 15 horas. Fogão a funcionar entre 50% (Abril e Outubro) e 80% da sua potência máxima	
Ferro fundido 10 kW	Operação durante as 18 – 23 horas	
Mansory 2 kW	Sem Piso radiante Funcionamento entre 50% a 80% da capacidade máxima.	
Mansory 3 kW	Operação durante todo o dia	
Sem recuperador de calor	Aquecimento com piso radiante programado para a temperatura de 20 °C das 18-23 horas e 18 °C para o restante horário.	

É de referir que, a combustão de biomassa de pequena escala em fogões de ferro fundido terá de ser acompanhada por um sistema de aquecimento de apoio, devido às suas características de produção de energia térmica de forma intermitente e às rotinas de operação dos fogões a biomassa.

Mais ainda, os fogões de massa térmica apresentam uma potência térmica útil relativamente baixa, devido à sua elevada inércia térmica, libertando calor de forma progressiva.

Os resultados mais representativos obtidos para as simulações energéticas realizadas serão apresentados nas Figuras 3-1 à 3-4. É importante referir que, os cenários de simulação da utilização de fogões *Mansory* consideram que apenas se utiliza o sistema de aquecimento e arrefecimento convencional para o final da Primavera e Verão.

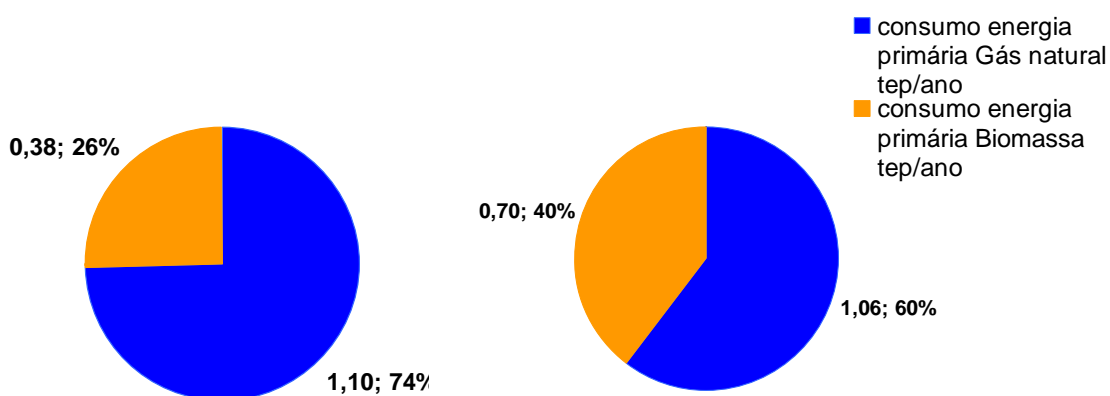


Figura 3-1 Consumos de energia primária (tep/ano) para aquecimento e arrefecimento de espaços em moradias com isolamento térmico na Dinamarca para fogões de ferro fundido (esquerda) 5kW e de tijolo 2 kW (direita).

Da análise da Figura 3-1 resulta que, para habitações modernas com isolamento térmico, a percentagem de energia primária utilizada associada à biomassa, relativamente ao total de energia primária utilizada para o aquecimento do edifício em análise, varia entre os 26 e os 40 %, aquando da utilização de fogões de ferro fundido de 4 kW (CI 4kW) e de fogões *Mansory* de 2 kW (MS 1,6 e MS 2,5).

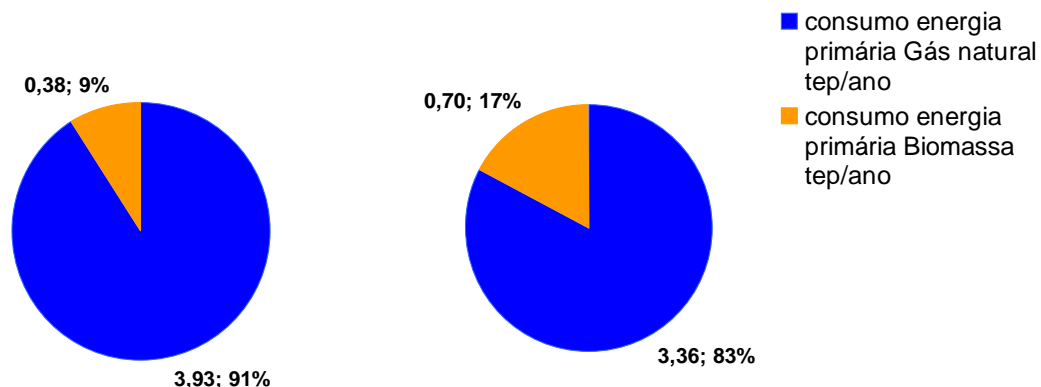


Figura 3-2 Consumos de energia primária (tep/ano) para aquecimento e arrefecimento de espaços em moradias sem isolamento térmico na Dinamarca para fogões de ferro fundido (esquerda) 5kW e de tijolo 2 kW (direita).

Já para as habitações sem isolamento térmico, a percentagem de energia primária utilizada em biomassa, relativamente ao total de energia primária utilizada para o aquecimento do edifício considerado no modelo numérico, varia entre os 9 e os 17 %, aquando da utilização de fogões de ferro fundido de 5 kW e de fogões Mansory de 2 kW.

De seguida passa a apresentar-se os resultados relativos aos consumos de energia final nos para diferentes cenários de aquecimento residencial a biomassa e a temperatura máxima atingida no interior da habitação durante a estação de aquecimento doméstico – médias horárias (utilização de fogão de ferro fundido . Ferro fundido 5 kW, de massa térmica – MT 2 kW e MT 2 kW, sem fogão), em habitações com isolamento térmico.

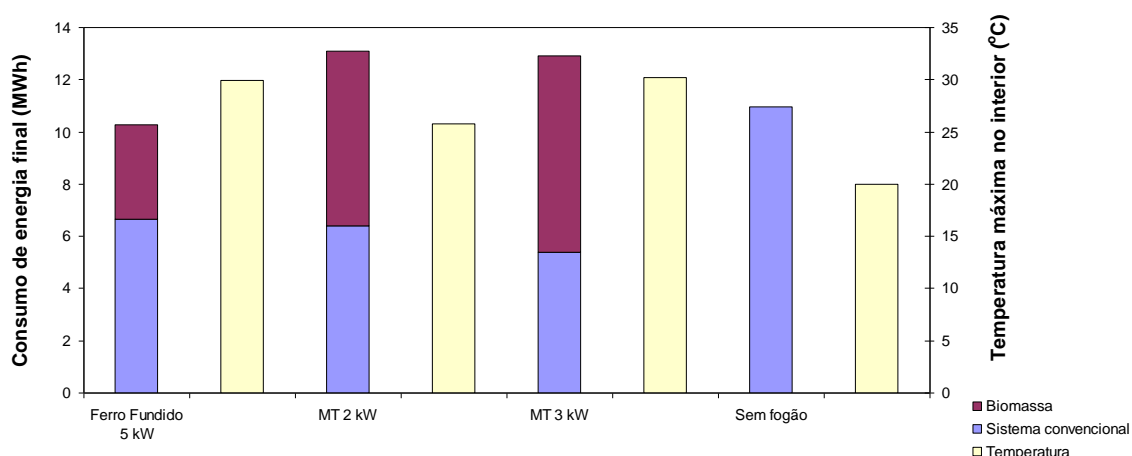


Figura 3-3 Consumos de energia final (MWh/ano) para aquecimento de espaços em moradias com isolamento na Dinamarca.

Da análise da Figura 3-3 podemos verificar que, o aquecimento doméstico a biomassa com fogões de massa térmica em habitações modernas apresenta uma maior contribuição para a produção de energia final que os fogões ferro fundido, em condições típicas de operação dos respectivos sistemas. As simulações térmicas realizadas indicam que, estes sistemas podem contribuir em mais de 50% para o aquecimento doméstico em habitações modernas, considerando os cenários típicos de operação de cada tipo de fogão em habitações unifamiliares. Por outro lado, também é possível observar na Figura 3-3 que os fogões de ferro fundido podem conduzir a um sobre aquecimento das habitações, podendo atingir temperaturas máximas de 30°C durante o Inverno.

Na Figura 3-4 são apresentados os resultados relativos aos consumos de energia final para diferentes cenários de aquecimento residencial a biomassa e a temperatura máxima atingida no interior da habitação sem isolamento, durante a estação de aquecimento doméstico – médias horárias (utilização de fogão de ferro fundido, de massa térmica, sem fogão).

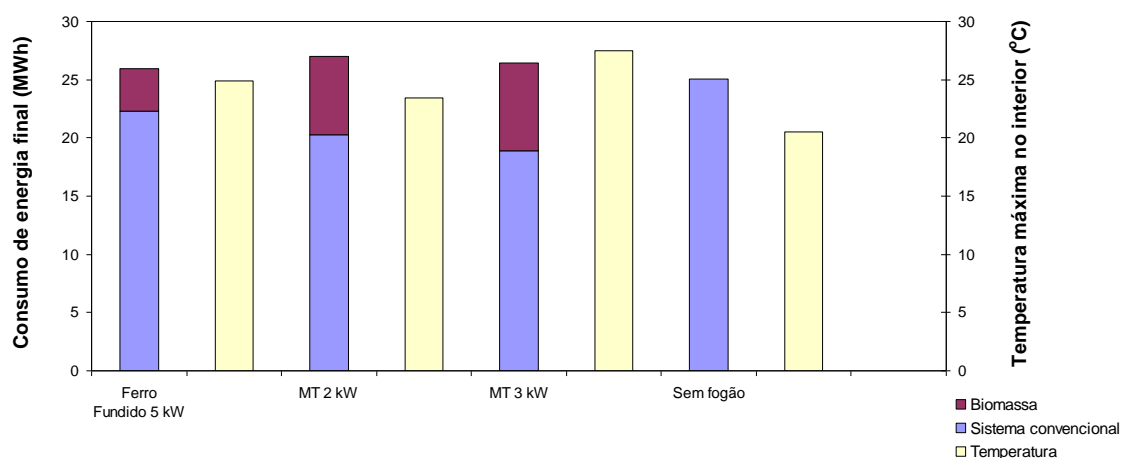


Figura 3-4 Consumos de energia final (MWh/ano) e primária (tep/ano) para o aquecimento de espaços em habitações sem isolamento na Dinamarca.

Para o caso de habitações sem isolamento térmico, a temperatura máxima nos períodos de utilização dos fogões a biomassa em estudo é de 23 °C e 25 °C, respectivamente para os fogões Mansory 2 kW e ferro fundido 5 kW.

Por outro lado, os resultados obtidos a partir das simulações térmicas deste caso de estudo indicam que os fogões de massa térmica têm um desempenho térmico

relativamente adequado às necessidades de aquecimento, quer para as habitações modernas, quer para as construções mais antigas.

Relativamente à racionalização dos consumos de energia, podemos observar que, os fogões *Mansory* podem contribuir para uma maior utilização do combustível biomassa, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

3.2 CASO DE ESTUDO EM HABITAÇÕES UNIFAMILIARES

Foram realizadas durante os meses de Janeiro, Fevereiro e Abril medições de parâmetros de conforto térmico e de QAI, incluindo a aplicação do método *Perfluorocarbon tracer gas (PFT)* para a determinação da taxa de renovação de ar, em 6 habitações unifamiliares localizadas em zonas rurais a cerca de 50 km da capital Dinamarquesa - Copenhaga. Foram realizadas medições nas 6 habitações em estudo, segundo a metodologia que será apresentada de seguida.

Foram realizadas medições de temperatura, humidade relativa e parâmetros de QAI, nomeadamente para as concentrações de CO, CO₂, COVs totais e partículas, com o auxílio de equipamentos de medição em contínuo, com equivalência demonstrada relativamente aos respectivos métodos de referência. Foram também determinadas as taxas de renovação de ar para cada edifício através da determinação da concentração de gás traçador em tubos absorventes - método PFT. Os instrumentos utilizados encontram-se descritos abaixo ou no Anexo C:

- Tiny tags SBI (Temperatura e humidade relativa);
- P-Track Model 8525 Ultrafine Particle Counter (medição da concentração de partículas ultra finas);
- Modelo 3007 CPC Ultra fine Particle Counter (medição da concentração de partículas ultra finas);
- Laser II-110 Optical Particle Counter (medição da concentração de partículas com distribuição por tamanhos);
- Analisador de gases CO, CO₂ e COVs totais;
- Gás traçador Perfluorocarbono e respectivos tubos de vidro absorventes de gás traçador – BNL.

3.2.1 MEDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO E QAI

As campanhas de medição de parâmetros de conforto térmico e QAI decorreram durante Abril de 2009 e Janeiro-Fevereiro de 2010. As medições foram realizadas durante um período em que se verificaram condições ambientais e meteorológicas idênticas às condições observadas durante a operação rotineira dos fogões a lenha em estudo para a Primavera e Inverno.

A temperatura e humidade relativa foi medida durante o período de Inverno e Primavera, segundo médias temporais de uma hora.

Com o objectivo de analisar o impacto da combustão doméstica de biomassa na qualidade do ar interior realizaram-se, em simultâneo, medições de partículas, CO, CO₂ e COVs totais no interior e exterior do edifício. Seleccionaram-se, para cada uma das habitações, um ponto de medição onde se pudesse determinar um valor representativo da concentração média dos poluentes para o espaço interior em estudo e um ponto no exterior, onde se pudesse determinar a concentração média de fundo da zona onde se encontravam as moradias em análise. As medições de temperatura e humidade relativa foram efectuadas para o período de Inverno e Primavera, tendo sido colocados termo-higrómetros (*Tiny tags*) no centro do compartimento onde se localizava o fogão a biomassa à altura de 1.0 - 1.5 m do chão e no exterior da habitação a cerca de 2 – 3 metros da área de admissão de ar novo para o edifício.

No que diz respeito à análise de QAI foram realizadas medições de CO, CO₂, COVs e partículas em 4 habitações (A, B, D e E), tendo-se realizado apenas medições de partículas finas para as restantes habitações (C e F). As medições de poluentes atmosféricos em análise foram efectuadas para o período de 3 horas e meia em cada ensaio. As amostragens iniciaram-se 2 horas antes do início da combustão, tendo-se prolongado até 30 minutos após a extinção do ciclo de combustão.



Figura 3-5 Contadores de partículas ultra-finas localizados no centro da sala de estar de um das habitações em estudo (esquerda) e num ponto no exterior de uma das habitações em estudo (direita).

3.2.2 MEDIÇÕES DE TAXA DE RENOVAÇÃO DE AR

A taxa de renovação é determinada com base na quantificação da variação da concentração de gás traçador - *Perfluorocarbon Tracer Gas Method (PFT)*, através da técnica de cromatografia gasosa, realizada nos laboratórios do SBi, em Hørsholm. A amostragem de gás traçador foi realizada através de um método passivo em tubos de vidro absorvente, tendo as amostras sido posteriormente analisadas por cromatografia gasosa (determinação da concentração final de gás traçador realizada pelo investigador Bergsøe, N.).

O equipamento foi desenvolvido pelo Brookhaven National Laboratory nos Estados Unidos (BNL), tendo o método sido testado em investigações realizadas no âmbito da ventilação em edifícios pelo BNL e SBi a partir da década de 90 [41].

As amostragens relativas ao método *Perfluorocarbon tracer gas (PFT)* foram realizadas para cada uma das habitações em estudo, durante as semanas em que se realizaram as amostragens de qualidade do ar. Os tubos emissores de gás traçador e os tubos de vidro absorventes foram colocados em diversas divisões da habitação, a fim de aferir os caudais volumétricos de troca de ar entre as mesmas.

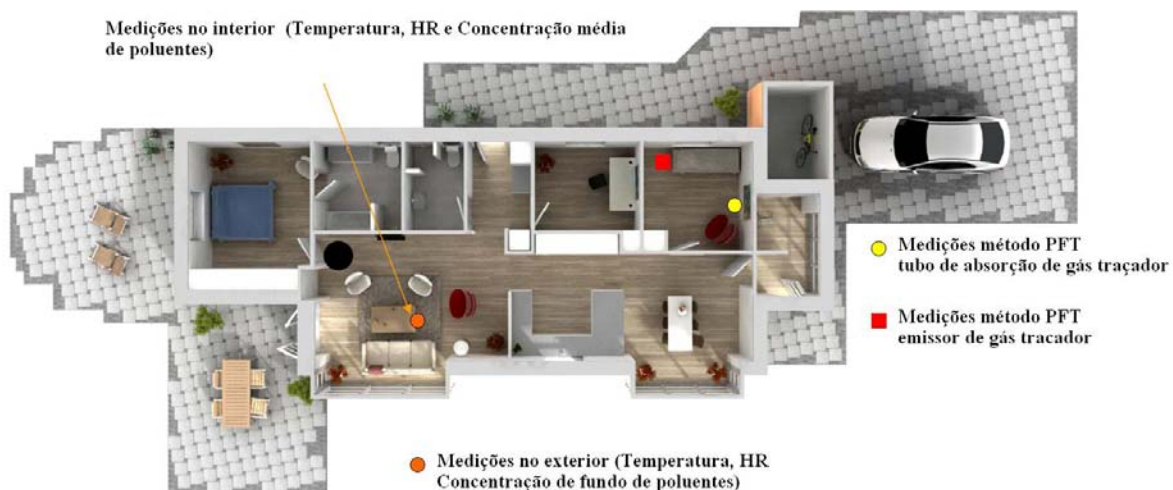


Figura 3-6 Esquema de localização dos pontos de medição seleccionados nas amostragens de QAI e taxas de renovação de ar novo [16].

Posteriormente, procedeu-se, no laboratório do SBi, à determinação da concentração do gás traçador absorvido pelos tubos de vidro, recorrendo à técnica de cromatografia gasosa [40].

Na tabela 3-2 é apresentada informação geral relativa às medições realizadas nas 6 habitações.

Da observação da tabela 3-2, podemos verificar que, a habitação B (construída em 1977) apresenta a maior taxa de renovação de ar, enquanto a habitação E (construída em 2009) apresenta a menor taxa de renovação de ar ($0,33 \text{ h}^{-1}$). É importante referir que, para a habitação B não se obtiveram dados de temperatura no interior e exterior da residência para o inverno devido a problemas em termos logísticos.

Tabela 3-2 Resumo das características gerais das medições realizadas.

Moradia	Ano	Fogão	Renovação de ar Primavera	Renovação de ar Inverno	Sistema energético principal	Temperatura interior (°C) ^a	Temperatura exterior (°C) ^a
A (Hillerød)	2001	Ferro fundido 5 kW 78%	0,59±14%	-	Gás Natural	22,3	-1,1
B (Espegaerde)	1977	Mansory 2,5 kW 80%	0,61±17%	-	Gás Natural	-	-
C (Ringsted)	2006	Mansory 2,5 kW 85%	-	0,58±16%	District heating	20,9	0 - (-5)
D (Vaerløse)	2008	Ferro fundido 6kW 78%	-	0,40±16%	Gás Natural	22,3	0- (-5)
E (Esrum 2)	2009	Ferro fundido 5 kW 79%	0,33±30%	1,10±15%	Bomba de calor	24,1	-1,7
F (Virum)	2007	Ferro fundido 78%	0,55±18%	-	Gás Natural	21,5	0- (-5)

^a Temperatura média durante 1 - 2 meses no inverno

3.2.3 CONSUMOS DE ENERGIA EM HABITAÇÕES

A fim de comparar os consumos energéticos relativos ao ano de 2009 para cada uma das 6 habitações construídas em diferentes períodos, calculou-se o consumo de energia final para aquecimento de espaços. Após a análise dos questionários aos proprietários de cada habitação, procedeu-se ao cálculo dos consumos de energia útil (E_{th}) (MWh/ano) para aquecimento de espaços, sendo estes dados pela Equação 2.

$$E_{th} = E_{SE1} + E_{fb} \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo E_{SE1} a energia final para aquecimento de espaços, emitida pelo sistema principal de conversão de energia e E_{fb} a energia final emitida pelo fogão a biomassa. Neste caso

de estudo, o sistema principal de aquecimento de espaços pode ser um sistema *district heating*, bomba de calor ou caldeira a gás natural, conforme indicado na tabela 3-2.



Figura 3-7 Equipamentos utilizados para o aquecimento de espaços na habitação A – caldeira a Gás natural (à esquerda) e fogão a biomassa (à direita).

Para as habitações que utilizaram gás natural como principal combustível para o aquecimento de espaços, recorreu-se à equação 3 para o cálculo da energia final para aquecimento de espaços (E_{GN}).

$$E_{GN} = \dot{V}_{cc} \cdot \rho_{cc} \cdot PCI_{cc} \cdot \frac{f_c}{100} \quad (\text{Eq. 3})$$

Para calcular o consumo de energia final gerada por fontes de energia fóssil é necessário saber qual o consumo anual de gás natural em volume de gás, bem como as suas propriedades físicas (massa volúmica - ρ_{cc} - e poder calorífico inferior - PCI_{cc}).

Considerando que ocorrem perdas de calor durante a aspiração de ar de combustão do interior do edifício para o fogão a biomassa, a quantidade de energia transferida pelo recuperador de calor para o espaço em aquecimento é dada pela seguinte expressão.

$$E_{fb} = V_b \cdot \rho_b \cdot PCI_b \cdot \eta_f - E_{perdas} \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo V_b = consumo anual de biomassa; ρ_b = massa volúmica da biomassa utilizada – valor médio representativo do tipo de madeira normalmente utilizada; PCI_b = valor médio representativo do poder calorífico inferior para a madeira normalmente utilizada; E_{perdas} = calor removido da habitação devido ao ar de combustão proveniente do interior.

As perdas de calor no edifício causadas pela combustão de biomassa são calculadas em função do volume de ar de combustão consumido por unidade de massa de biomassa e o consumo de lenha por ano.

$$E_{perdas} = \dot{V}_{ab} \cdot \dot{m}_{ba} \cdot 0,34 \cdot \Delta T_{ie} \quad (\text{Eq. 5})$$

Sendo,

\dot{V}_{ab} = Volume de ar de combustão consumido por kg biomassa.

\dot{m}_{ba} - Consumo de biomassa por ano.

ΔT_{ie} - Diferença de temperatura entre o interior e exterior do edifício.

A partir dos cálculos realizados, verificou-se que, apenas aproximadamente 2% do calor fornecido pelo fogão a biomassa ao edifício é removido do edifício, pelo processo de convecção natural de ar de combustão do interior do edifício para dentro da câmara de combustão.

Na figura 3-8 passa-se a apresentar os resultados relativos ao consumo de energia de energia final para as diferentes habitações (sistema energético principal – SE1 - e fogão a biomassa), objecto de análise neste caso de estudo, nomeadamente o consumo de energia final para aquecimento de espaços e AQS. Na figura 3-8 é indicada a letra e o ano de construção correspondente a cada habitação.

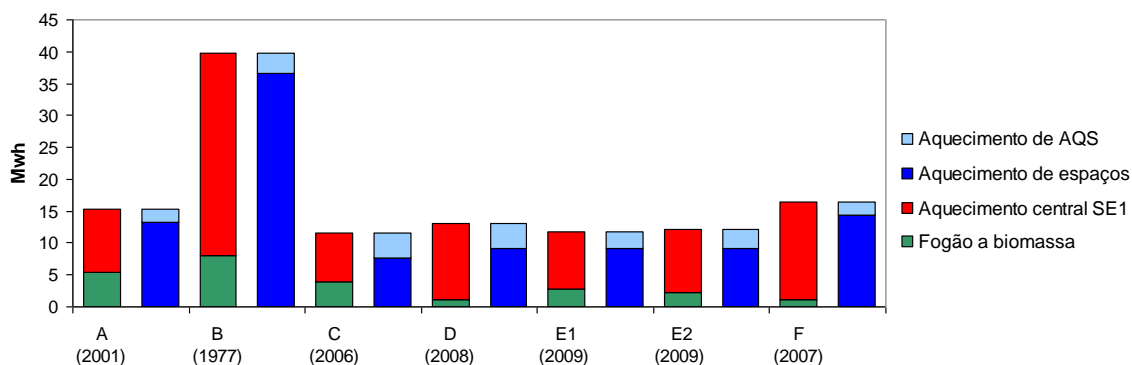


Figura 3-8 Consumos de energia final para o aquecimento de espaços e águas quentes sanitárias nas 6 habitações deste caso de estudo.

Da análise gráfica podemos observar que a habitação B (construída no ano de 1977) em *Espergærde* apresenta os consumos de energia para aquecimento mais elevados, sendo cerca de 20% da energia final proveniente da operação de um fogão de massa térmica para aquecimento residencial. A habitação C e E, construídas em *Ringsted* e *Esrum* (1 e 2) , respectivamente nos anos de 2006 e 2009, são as residências que apresentam os menores consumos de energia final para aquecimento. Nestes casos, cerca de 20-25% da energia final consumida para aquecimento é proveniente da queima de biomassa, mas desta vez num fogão de ferro fundido com certificado pela norma Europeia *EN-13240 (room heaters)*.

Com o objectivo de comparar o consumo de energia para aquecimento de espaços em cada uma das habitações em estudo (ano de 2009), com os requisitos de referência estabelecidos pelo regulamento Dinamarquês de Edifícios (BR 2008) para cada ano, utilizaram-se aproximações, realizadas por Søren Aggerholm (*Danish Building Research Institute*), relativas aos valores limite de energia final para aquecimento de espaços em habitações unifamiliares, construídas em diferentes anos [15].

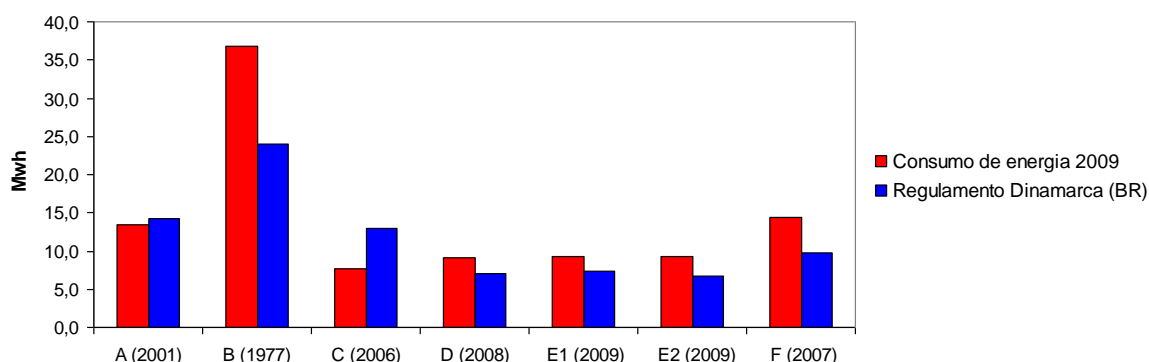


Figura 3-9 Consumos de energia final para o aquecimento de espaços nas 6 habitações do caso de estudo e valores de referência dados pelo regulamento Dinamarquês dos edifícios [15].

Da análise da Figura 3-9 verifica-se que, apenas os edifícios A e C apresentam consumos de energia final, para aquecimento de espaços, inferiores aos valores estabelecidos pela estimativa realizada pelo SBi. Para o caso dos edifícios E₁ e E₂ verificou-se que as bombas de calor instaladas nesta área revelavam problemas de operação, facto que poderá estar associado a problemas na conversão da energia geotérmica na região a energia térmica para o aquecimento dos edifícios [15]. Outra das razões que pode justificar o elevado consumo de energia para aquecimento de espaços pode estar relacionada com as temperaturas exteriores baixas durante o ano de 2009.

3.2.4 MEDIÇÕES DE PARÂMETROS DE CONFORTO TÉRMICO

Conforme descrito no capítulo 2, foram realizadas medições de temperatura e humidade relativa (HR) no exterior e interior em cada uma das 6 habitações, durante períodos na Primavera e Inverno. Em paralelo com a análise energética realizada para as simulações de transferência de calor apresentadas no ponto 3.1, efectuou-se a comparação entre as temperaturas interiores determinadas em residências com isolamento térmico e habitações sem isolamento térmico.

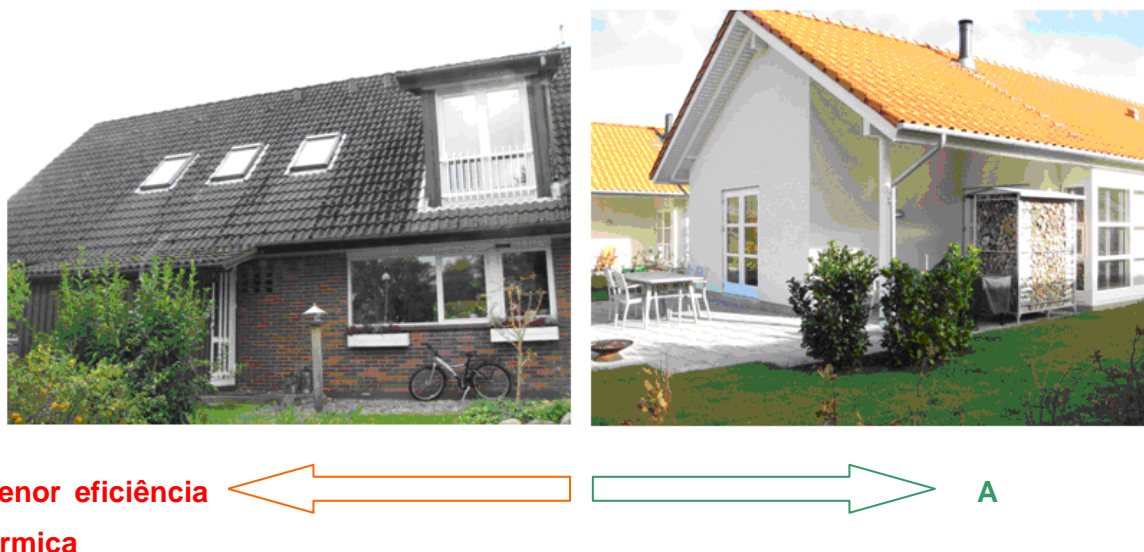


Figura 3-10 Tipologias de habitação Dinamarquesa unifamiliar. Habitação construída na década de 80 em *Espergæde* (B - esquerda) e habitação construída no ano 2009 em *Esrup* (E₂ - direita).

Passa-se a apresentar os resultados relativos às medições de temperatura e humidade relativa para uma semana no mês de Abril - interior e exterior da habitação B e E. É importante referir que, os valores apresentados nas Figuras 3-11 e 3-12 dizem respeito a médias horárias.

Da observação das Figura 3-11 podemos verificar que, a temperatura interior para a habitação B (temperaturas máximas de 26.5°C; taxa de renovação de ar = 0,61), onde se utiliza um fogão de massa térmica, não varia de forma tão acentuada como para o caso da habitação E (temperaturas máximas de 30°C; taxa de renovação de ar = 0,33), onde existe um fogão de ferro fundido certificado.

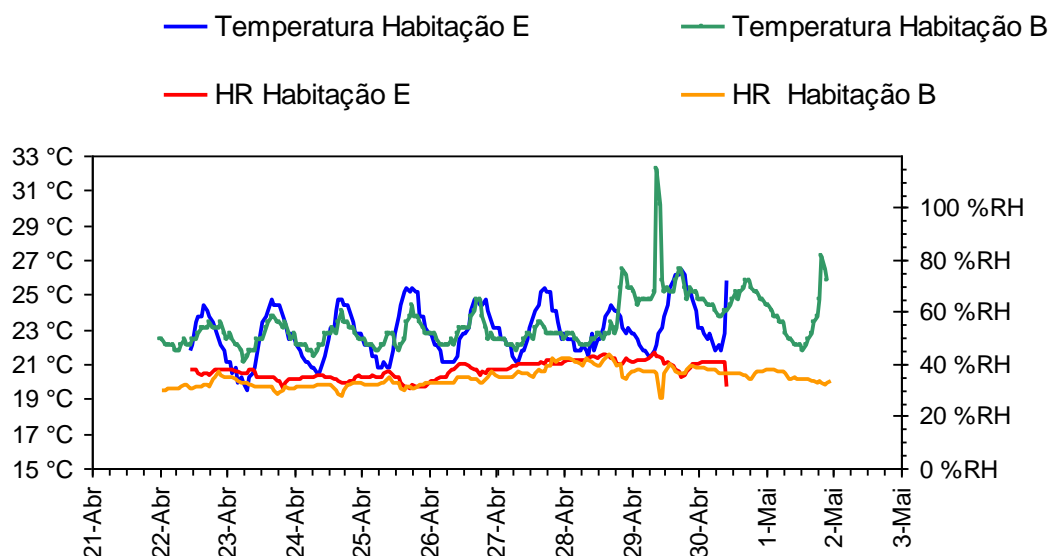


Figura 3-11 Temperatura e humidade relativa durante o mês de Abril no interior da habitacão B e E₂.

Podemos também verificar que, no dia 29 de Abril, quando ocorreu um aumento de temperatura no interior da habitacão B, ocorre uma diminuicão da humidade relativa (HR), facto que poderá ser justificado pelo elevado aumento de temperatura verificado nesse dia no exterior da habitacão B (dia quente de Primavera).

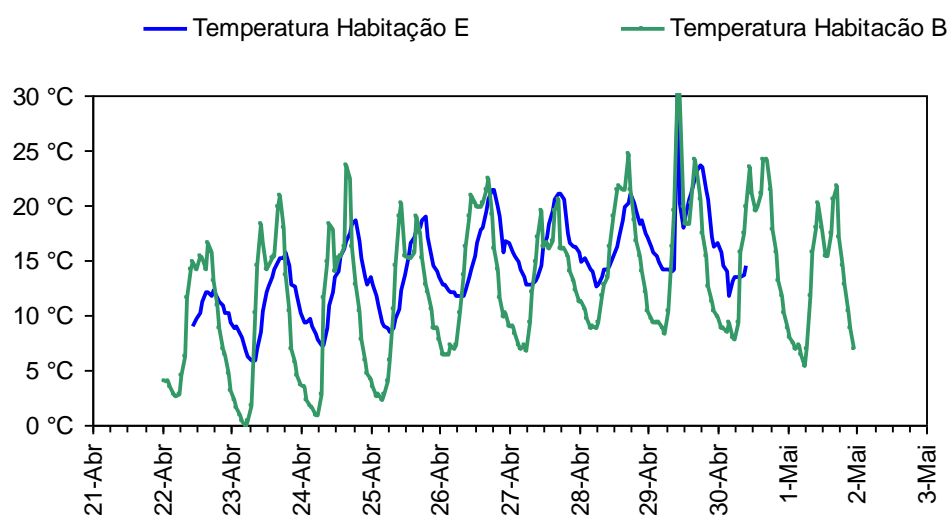


Figura 3-12 Temperatura e humidade relativa durante o mês de Abril no exterior da habitacão B e E₂.

Por outro lado, podemos observar na Figura 3-14 que a variação de temperatura no exterior da habitação B (temperaturas máximas de 30°C; temperaturas mínimas de 0°C) é mais acentuada que para o caso da habitação E (temperaturas máximas de 30°C; temperaturas mínimas de 6°C), pelo que podemos concluir que a maior amplitude de temperaturas no interior da habitação E não está directamente relacionada com a evolução de temperaturas no exterior.

De seguida, passa-se a apresentar os resultados relativos às medições de temperatura e humidade relativa ano de 2009 para o interior e exterior da habitação E no período de inverno.

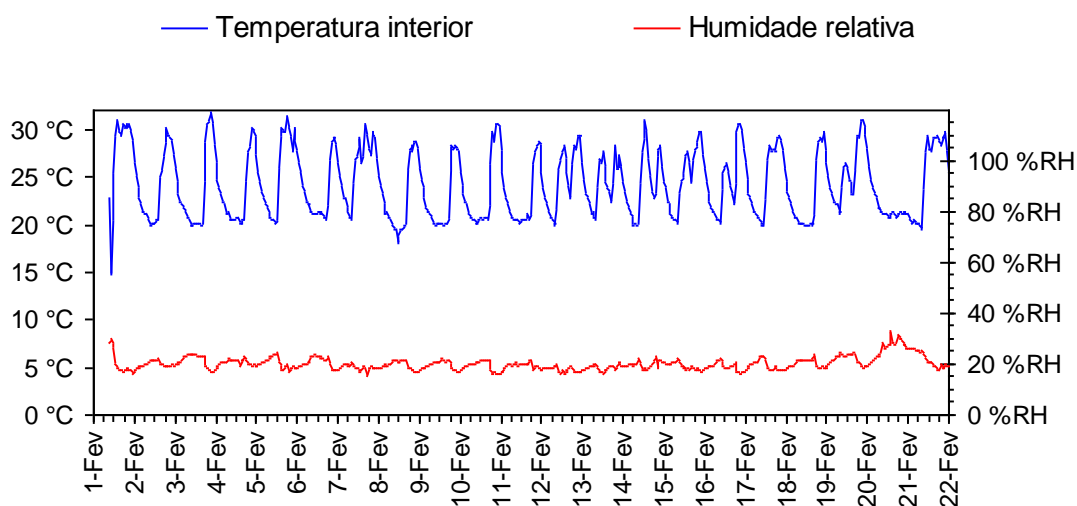


Figura 3-13 Temperatura e humidade relativa durante o mês de Fevereiro na habitação E₂, com isolamento térmico.

Da análise da figura anterior podemos observar variações de temperatura entre os 20 e os 30 °C, mesmo durante o inverno, destacando-se os baixos níveis de humidade relativa verificados ao longo do mês de Fevereiro (em média 20%). Verificou-se igualmente que, os perfis de temperatura no interior da habitação E se aproximam das temperaturas previstas pelo *software* de simulação dinâmica *BSIM – Building Simulation*. Na Figura 3-13 podemos observar a variação da temperatura ao longo do dia, havendo um aumento no início da tarde, que poderá coincidir com a utilização do recuperador de calor, na medida em que o dispositivo de medição foi colocado numa zona próxima ao fogão, no compartimento onde este se localizava.

3.2.5 MEDIÇÕES DE PARÂMETROS DA QAI

Na análise geral realizada para a QAI foram realizadas medições da concentração de 4 compostos físico-químicos no exterior e interior das habitações, nomeadamente à concentração de CO, CO₂, COVs e partículas (partículas torácicas, finas e ultra-finas) no interior e exterior dos edifícios em estudo. Esta análise geral da QAI foi realizada durante uma campanha de amostragem decorrida em Abril, em que foram realizadas medições para todos os parâmetros descritos, para as habitações A, B, D e E.

Os ensaios realizados em cada habitação foram efectuados segundo as condições normais de combustão de biomassa, segundo a rotina habitual de utilização do fogão por parte dos ocupantes. Realizou-se um ensaio de combustão para cada habitação, representando cada ensaio apenas um ciclo de combustão com a duração de aproximadamente 1 hora. As medições da concentração de CO, CO₂, COVs totais e partículas iniciaram-se cerca de 2 horas antes do início da combustão, com o objectivo de se determinarem as concentrações de poluentes para um período em que não decorreram actividades no interior do espaço em análise.

De seguida passa-se a apresentar a tabela resumo de resultados obtidos na campanha de amostragens realizada no mês de Abril – 1ª campanha de amostragem.

Tabela 3-3 Resumo de resultados obtidos na campanha de medições da QAI realizada em Abril de 2009.

Parâmetro / edifício	A (2001)	B (1977)	D (2008)	E ½ (2009)
Taxa de renovação (h ⁻¹)	0,59±14%	0,61±17%	0,40±16%	0,58±49% 0,33±30%
Temperatura média (°C)	22,3	26,1	22,3	24,1
[CO Max.] ppm	0,62	1,23	0,68	3,64 22,9
[CO ₂ max.] ppm	987	1290	829	891 1100
[COVs totais max.] ppm	7,93	7,18	11,7	6,76 7,56
[PM ₁₀ Max] (µg / m ³)	21,10	44,64	15,1	181,54 202,03
[PM ₁ Max] (µg / m ³)	2,73	2,23	3,55	170,47 180,82

E1: Ålykkevej 3D; E2: Ålykkevej 3E

Da análise dos resultados apresentados na Tabela 3-3 verifica-se que, para a maioria das habitações em estudo, as concentrações de poluentes medidas no ar interior não ultrapassam os valores guia estabelecidos pela OMS (ver Tabela 1-5). Apenas nos edifícios construídos no ano de 2009, que apresentaram taxas de ventilação mais baixas, a concentração da maioria dos poluentes pode atingir níveis próximos dos valores guia estabelecidos para tempos de exposição de curta duração (1 hora) ou até mesmo ultrapassar os valores limite estabelecidos pelo RSECE relativos à concentração de partículas PM₁₀. Por outro lado, as concentrações de CO₂ revelaram-se próximas dos valores limite apresentados na Tabela 1-5, facto que pode estar associado à presença dos técnicos de medição durante o período de amostragem, nos compartimentos onde se realizaram as medições de QAI.

A fim de se comparar os resultados obtidos na análise de QAI geral realizadas em habitações unifamiliares modernas e antigas, passa-se a apresentar a análise da evolução da temperatura e as concentrações dos parâmetros de QAI em estudo para as habitações B e E₂, respectivamente.

As medições dos parâmetros de caracterização da QAI foram efectuadas no interior e exterior das habitações B e E₂ nos dias 14 e 22 de Abril, respectivamente para a habitação B e E₂. Apesar de terem sido realizadas em dias diferentes, as amostragens foram efectuadas segundo a mesma metodologia, em condições meteorológicas e ambientais semelhantes. Recorde-se que, as amostragens foram realizadas durante dois ensaios de combustão de biomassa num fogão de massa térmica de 2.5 kW de potência térmica útil (habitação B) e num fogão de ferro fundido certificado de 5 kW de potência térmica útil (habitação E₂).

Nas duas situações, o início da combustão de madeira deu-se pelas 11:25 da manhã. A taxa média de consumo de lenha para o fogão de massa térmica sido de 18 kg/dia, enquanto que a taxa média de consumo de biomassa para o fogão de ferro fundido foi de 1.8 kg/h.

Tabela 3-4 Informações sobre os ensaios realizados em 2 tipos distintos de habitações.

Habitação / Dados	Ano de Construção	Dia das medições	Fogão a biomassa
B (sem isolamento)	1977	14 de Abril	Massa térmica 2.5kW
E ₂ (com isolamento)	2009	22 de Abril	Ferro fundido 5 kW

Passamos a apresentar uma análise da evolução dos parâmetros de conforto térmico ao longo do processo de combustão de lenha para os edifícios B e E₂, para condições meteorológicas e ambientais exteriores idênticas nos dois dias de medição.

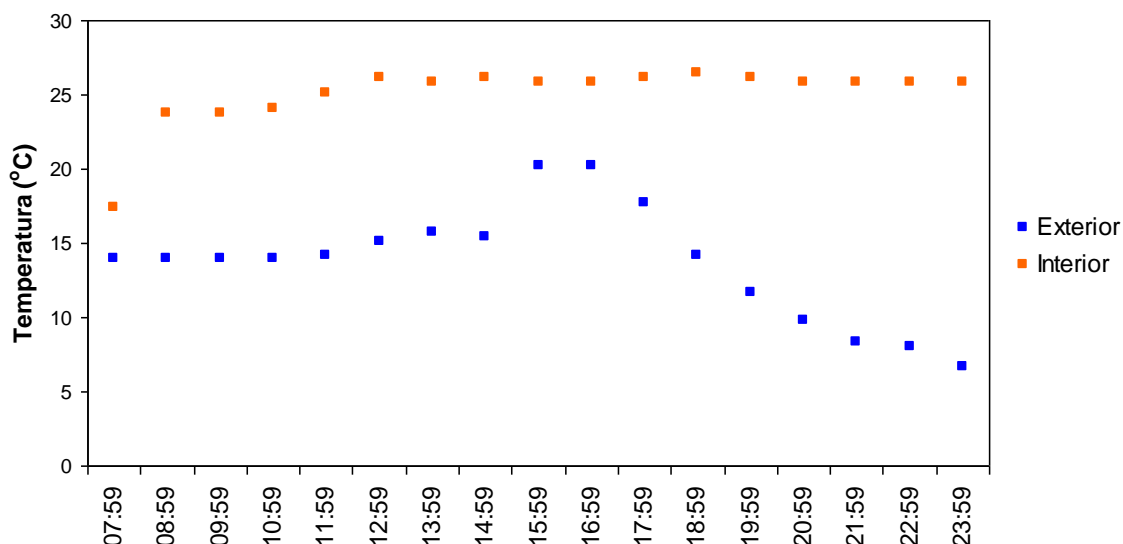


Figura 3-14 Evolução da temperatura no interior e exterior da habitação B, durante a combustão de biomassa num fogão de massa térmica – dia 14 de Abril.

A Figura 3-14 permite-nos observar as variações de temperatura no interior e exterior da habitação B, sem isolamento térmico, verificando-se que o aumento da temperatura interior no início da manhã não é influenciado pela temperatura exterior, pois esta mantém-se constante. Verifica-se que, após o início da combustão de biomassa (pelas 11:30), a temperatura no interior da habitação B aumenta 1 – 2 °C aproximadamente constante durante o resto do dia. A temperatura interior pode ultrapassar os 25°C (após as 13 horas), enquanto a temperatura exterior chega a atingir os 20°C (às 16 horas). Verifica-se que, após o ensaio de combustão a temperatura exterior começa a baixar (pelas 17 horas), enquanto que a temperatura interior se mantém constante. Esta situação reflecte a característica de elevada térmica dos fogões *Mansory*.

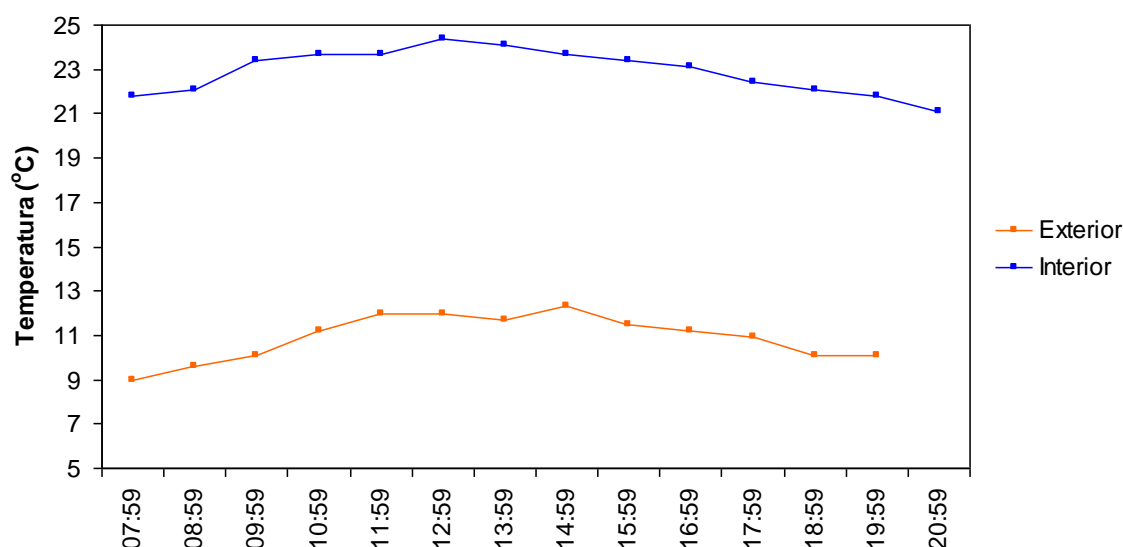


Figura 3-15 Evolução da temperatura no interior e exterior da habitação E₂, durante a combustão de biomassa num fogão de ferro fundido certificado – dia 22 de Abril.

A Figura 3-15 permite-nos observar as variações de temperatura no interior e exterior da habitação E, com isolamento térmico, verificando-se que o aumento da temperatura interior segue a variação da temperatura exterior, enquanto que a meio da manhã a situação parece inverter-se. A temperatura interior pode aproximar-se dos 25°C (às 12 horas), enquanto a temperatura exterior não chega a atingir os 15°C (às 14 horas). Verifica-se que, após o ensaio de combustão de biomassa, a temperatura interior começa a baixar (pelas 13 horas), mesmo antes do decréscimo da temperatura no exterior (pelas 14 horas).

Relativamente aos resultados das medições no de parâmetros de QAI é importante referir que, estas foram efectuadas após a homogeneização do ar, recorrendo a um ventiloconvector portátil, sendo que durante a medição não ocorreram trocas de ar entre o exterior e o interior do edifício, exceptuando a ventilação mecânica ou natural, normalmente utilizada nestas habitações.

De seguida, passa-se a apresentar os resultados obtidos para a análise da evolução da concentração de CO ao longo do período de combustão de biomassa.

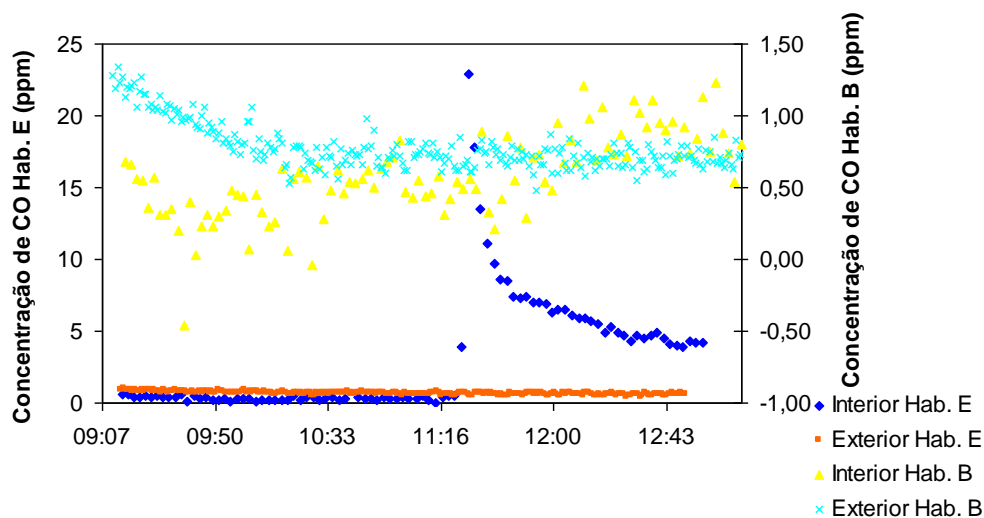


Figura 3-16 Evolução da concentração de CO no interior e exterior das habitações B e E₂, durante os ensaios realizados em Abril de 2009.

No que diz respeito à análise de CO, podemos observar que os seus níveis de concentração no ar interior não se alteram consideravelmente durante o processo de queima de biomassa na habitação B, enquanto que na habitação E ocorre um aumento em função do processo de combustão de biomassa. Os resultados obtidos para ambas as habitações afastam-se dos valores guia estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS) para o período de exposição de 1 hora - 26 ppm (ver tabela 1-5).

Por outro lado, considerando que se deu início à combustão de madeira às 11:25, pode verificar-se que a utilização do fogão *Mansory* na habitação B não causa um aumento concentração de CO no compartimento onde se efectuou a medição. Mais ainda, os níveis de contaminação exteriores apresentam uma tendência para se aproximarem dos valores verificados no interior da habitação B. Este facto pode ser explicado pela taxa de renovação de ar novo no edifício B ser mais elevada que para o edifício – 0.61 h^{-1} , enquanto que para o edifício E₂ a taxa de ventilação determinada foi de 0.33 h^{-1} . A elevada estanquidade do edifício mais moderno também pode ser uma das causas de ter ocorrido um aumento da concentração deste poluente no ambiente interior.

De seguida, passamos a apresentar os resultados obtidos para a evolução da concentração de CO₂ nos dois edifícios em estudo.

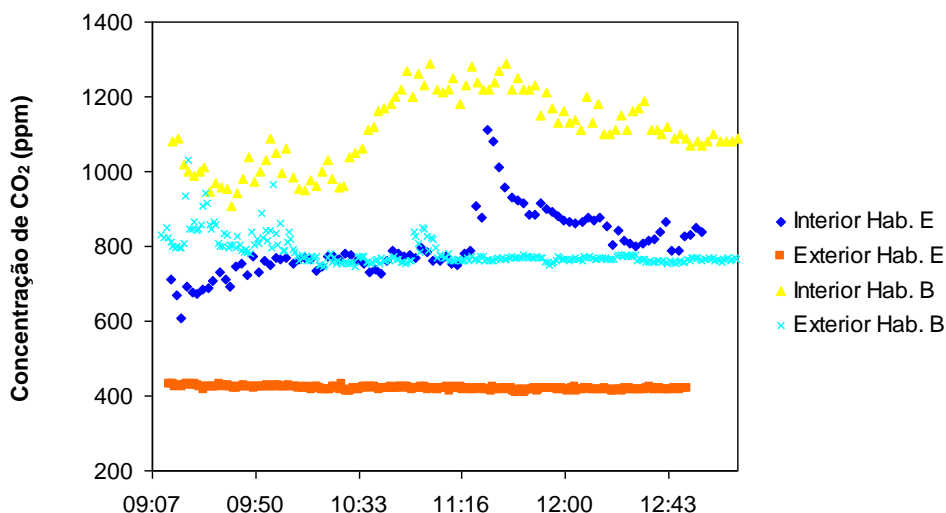


Figura 3-17 Evolução da concentração de CO₂ no interior e exterior das habitações B e E₂, durante os ensaios realizados em Abril de 2009.

Da análise da Figura 3-17 verifica-se que ocorrem variações da concentração de CO₂ após o início da combustão (pelas 11:30), para o edifício B e E₂. Contudo, mesmo antes da combustão de biomassa no edifício B ocorre um aumento da concentração de CO₂ no interior da sala de estar da habitação B. Esta situação pode estar associada à presença de 4 pessoas no interior do edifício durante o período das amostragens.

Na habitação E, verificou-se um aumento da concentração de CO₂ após o início da combustão de biomassa às 11:30. Durante toda a manhã a concentração deste parâmetro no exterior manteve-se constante. É importante referir que, os valores da concentração de CO₂ no interior de ambos os edifícios ultrapassam o valor limite de referência estabelecido pelo Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização de Edifícios (RSECE) - 972 ppm para um curto período de exposição (ver tabela 1-5).

Apesar do edifício B ter apresentado uma taxa de renovação de ar novo mais elevada do que o edifício E, a concentração de CO₂ na habitação B foi geralmente maior do que para a habitação E. Este facto pode ser justificado pelo elevado nível de concentração no exterior do edifício B, comparativamente com a concentração no exterior do edifício E₂.

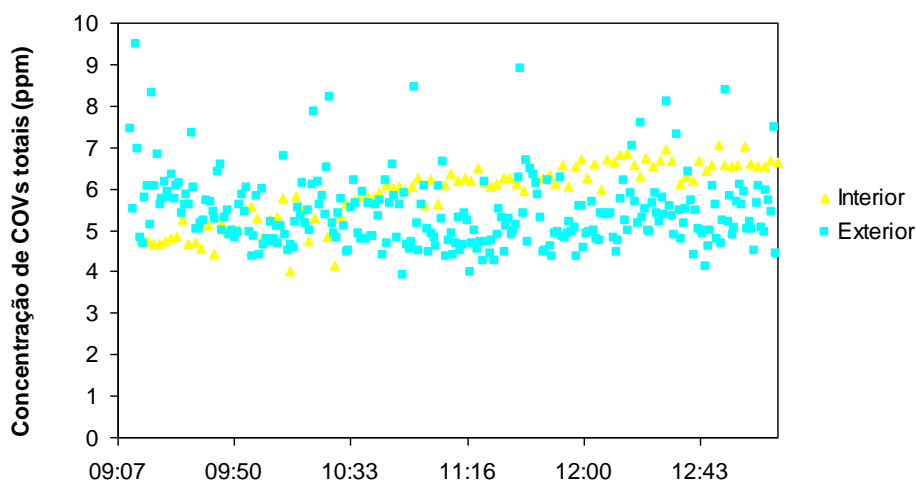


Figura 3-18 Concentração de COVs totais durante a combustão de biomassa na habitação B.

Tal como se sucedeu para o edifício B para o caso dos poluentes apresentados nas Figuras 3-16 e 3-17, não se verificou a variação da concentração de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) totais, ao longo do processo de combustão de biomassa. Por outro lado, a concentração interior e exterior se encontra aproximadamente na mesma gama de valores.

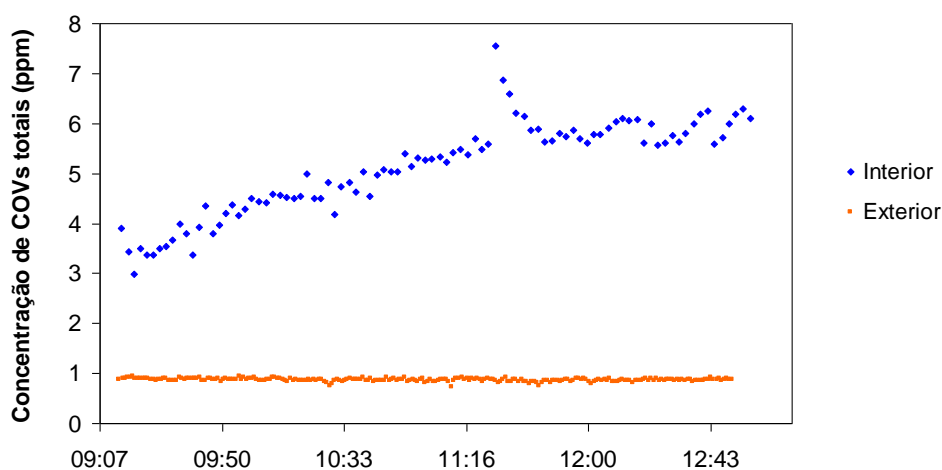


Figura 3-19 Concentração de COVs totais durante a combustão de biomassa para o edifício E₂.

Tal como para o caso dos poluentes anteriores, verificou-se uma variação da concentração de COVs totais, mas desta vez uma ligeira variação. No interior da habitação E₂ verificaram-se valores de concentração de COVs entre 3 a 7 vezes superiores aos valores obtidos para o exterior, facto que poderá estar associado ao processo de combustão de biomassa.

A concentração de COVs totais ultrapassou o valor estabelecido pela legislação Portuguesa para QAI, nomeadamente 0,16 ppm (Tolueno), facto que pode estar associado a cenários de contaminação do ar ambiente exterior e interior, devido à elevada utilização de fogões a biomassa nas regiões onde se realizou o estudo.

Relativamente à habitação B, não foi possível desenvolver uma análise acerca dos impactos da utilização de fogões a biomassa na QAI em termos de emissões de partículas torácicas e finas, devido a problemas técnicos na altura em que decorreram as amostragens.

Da análise dos resultados obtidos nas diferentes habitações, observaram-se variações de concentração de partículas inaláveis e respiráveis consideráveis após a combustão de biomassa para o caso das habitações modernas, com menores taxas de renovação de ar novo.

Passa-se a apresentar os resultados obtidos para a habitação E₁ e E₂ (habitação com maior eficiência térmica).

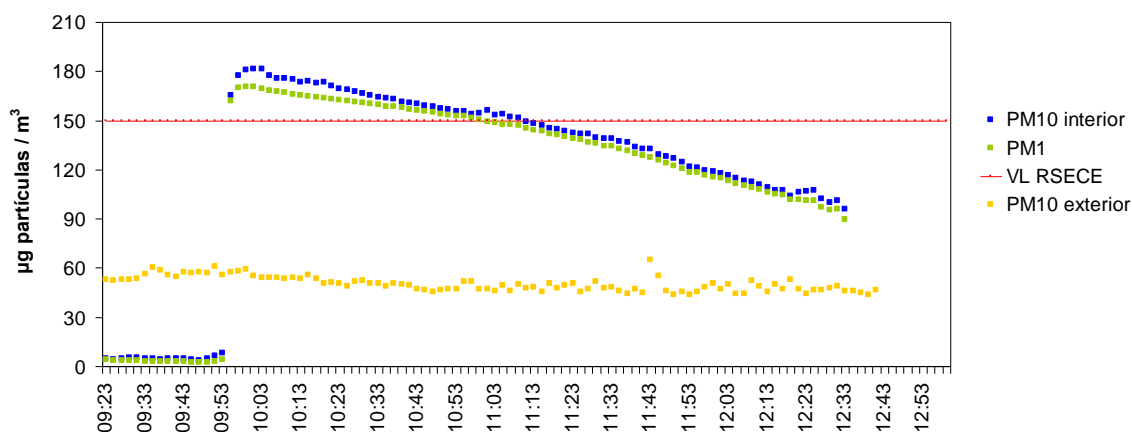


Figura 3-20 Evolução da concentração de PM₁₀ e PM₁ ao longo do processo de combustão na habitação E₁ em Abril.

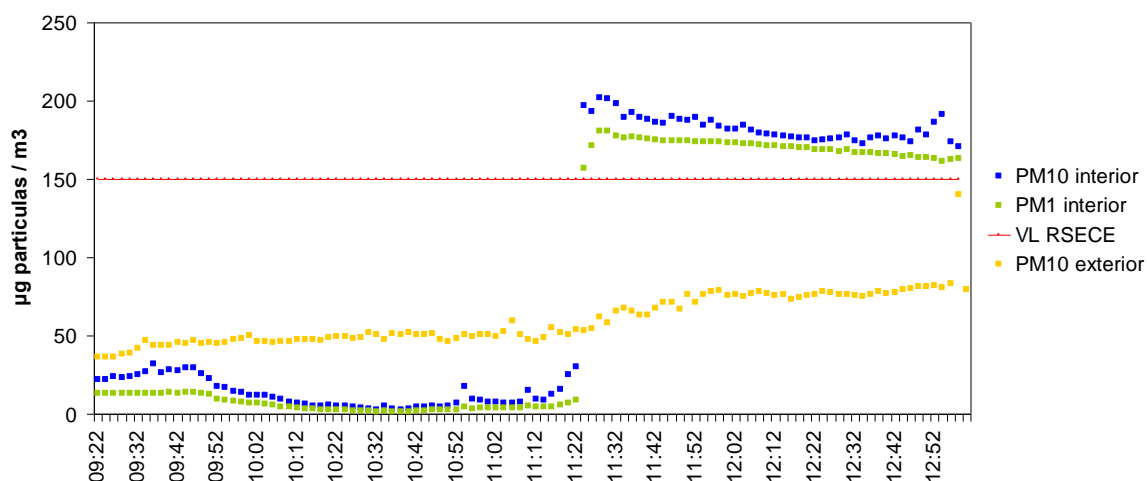


Figura 3-21 Evolução da concentração de PM₁₀ e PM₁ ao longo do processo de combustão na habitação E₂ em Abril.

É possível verificar que, para as habitações construídas no ano de 2009 (Figura 3-20 e 3-21), a concentração de partículas PM₁₀ e PM₁ varia logo após o início da combustão a meio da manhã, observando-se um aumento de concentração de partículas PM₁₀ para valores acima dos valores limite estabelecidos pela OMS, nomeadamente 50 µg m⁻³ – para 24 horas de exposição. No entanto, como a concentração tende a baixar novamente para valores inferiores a 50 µg m⁻³ num período inferior a 24 horas, parece-nos que este valor não servirá de referência para analisar este parâmetro do ponto de vista epidemiológico. Nas figuras 3-20 e 3-21 é apresentado o valor limite estabelecido pela legislação portuguesa para o período de 5 minutos de exposição (150 µg m⁻³) [18]. Para ambos os casos, durante o período de combustão de biomassa, a concentração de partículas atingidas no interior das habitações é superior ao dobro das concentrações de partículas verificadas no exterior.

Apesar de não se terem verificado em geral elevadas concentrações mássicas de partículas PM₁₀ e PM₁, a combustão de biomassa poderá contribuir para a emissão de partículas de ainda menores granulometrias em todos os edifícios analisados. É reconhecido que, as partículas ultra-finas podem ser emitidas em grandes quantidades, aquando da queima de madeira, e podem ser perigosas para saúde por penetrarem até à região dos alvéolos pulmonares, pelo que se efectuou uma análise mais detalhada deste poluente, aquando da utilização de fogões a biomassa. Efectuaram-se medições de partículas ultra-finas nas 6 habitações em análise neste caso de estudo, segundo uma metodologia análoga à aplicada para na análise geral à QAI, com vista à análise da

emissão deste tipo de partículas, provenientes dos fogões a lenha, para o interior das residências, através da aplicação de um modelo numérico. As medições de partículas realizadas na campanha decorrida em Abril foram realizadas em simultâneo com as medições dos poluentes do ar interior analisados anteriormente.

O modelo numérico de balanço mássico que pode ser aplicado na análise de gases contaminantes ou partículas, com vista ao estudo dos impactos da combustão de biomassa na qualidade do ar interior, foi desenvolvido por *Alireza, A.* [42]. Os pressupostos do modelo consideram que os gases ou partículas em estudo estão perfeitamente misturados no reservatório em estudo e que o caudal de insuflação de ar é idêntico ao caudal de extracção de ar (concentração de aerossóis homogénea no volume de controlo).

$$c_{r(t)} = \frac{c_s \cdot \dot{V}}{\dot{V} + rV} + \frac{\dot{M}}{\dot{V} + rV} - \frac{\dot{V}}{\dot{V} + rV} \left[c_s + \frac{\dot{M}}{\dot{V}} - \frac{\dot{V} + rV}{\dot{V}} c_{r(0)} \right] \cdot e^{-\left[\frac{\dot{V}}{V} + r \right] \cdot \tau} \quad (\text{Eq. 6})$$

A Equação 6 permite-nos obter uma expressão para estimar o caudal de emissão de partículas ultra finas provenientes da fonte emissora em análise (*source strength*), para intervalos de tempo de 1 minuto [9].

Para aplicar a referida equação, consideraram-se os dados experimentais obtidos durante as campanhas de medição, nomeadamente a concentração de partículas no exterior (zona de insuflação; num ponto representativo da concentração média de fundo da zona onde se encontra localizada a habitação em estudo) e interior do edifício (ponto representativo da concentração média no espaço em análise), bem como o volume interior de cada reservatório analisado.

Efectuou-se o cálculo da taxa de decaimento da concentração de partículas ultra finas com vista à determinação da constante de decaimento de partículas (T_{PD}), através da análise da curva de regressão do decaimento da concentração de partículas ultra finas. Por outro lado, a taxa de renovação de ar novo (T_{VENT}) foi determinada através do método de *Perfluorocarbon tracer* (PFT), sendo o cálculo de T_{VENT} realizado com base no volume interior de cada reservatório em estudo e das taxas de decaimento da concentração do gás traçador em cada edifício.

A Equação 7 que se segue estabelece a relação entre as variáveis anteriores, permitindo-nos determinar a taxa de remoção de partículas.

$$e^{-\frac{t}{T_{PD}}} = e^{-t \cdot (1/T_{VENT} + r)} \quad (\text{Eq. 7})$$

O modelo apresentado foi testado numa câmara de teste à escala real, através de medições de laboratório para diversas fontes de emissão de partículas ultra finas, tendo-se demonstrado elevada correlação com resultados experimentais em trabalhos desenvolvidos por Matson, U – coeficiente de correlação de 0,997 (Anexo A) [43].

Na Tabela 3-5 é possível observar que, no geral, os caudais de emissão de partículas ultra-finas estimados (valor máximo) são elevados quando os valores máximos de concentração de partículas ultra-finas no interior das habitações são mais elevados (habitação E₂).

Também é possível observar que, para as habitações A e D, os valores de concentração de partículas medidos no Inverno são superiores aos determinados durante a campanha decorrida na Primavera. Este facto pode estar associado às baixas temperaturas verificados no exterior durante o Inverno, que podem dificultar a exaustão dos gases de combustão [9]. No caso da habitação E verifica-se que, o nível de concentração de partículas ultra-finas no interior e exterior é da mesma ordem de grandeza, no entanto, a taxa de renovação média determinada no Inverno é superior ao valor determinado para a Primavera.

Tabela 3-5 Resumo de resultados obtidos nas medições de partículas ultra-finas em Abril de 2009, Janeiro e Fevereiro de 2010 – 1 e 2ª campanha de amostragem.

Edifício / parâmetro	Tipo de fogão	Taxa de renovação de ar (h ⁻¹)	Taxa de renovação de ar (h ⁻¹)	[partículas Max.] (partículas m ⁻³)	[partículas Max.] (partículas m ⁻³)	Caudais emissão (partículas h ⁻¹)	Caudais emissão (partículas h ⁻¹)
Período		Abril	Janeiro- Fevereiro	Abril	Janeiro- Fevereiro	Abril	Janeiro- Fevereiro
A (2001)	Ferro fundido 5 kW 78%	0,59±14%	-	4,62 · 10 ⁹	1,08 · 10 ¹⁰	0,00 · 10 ⁰	9,19 · 10 ⁷
B (1977)	mansory 2,5 kW 80%	0,61±17%	-	-	2,36 · 10 ¹⁰	-	1,97 · 10 ¹⁴
C (2006)	mansory 2,5 kW 85%	-	0,58±16%	-	1,55 · 10¹¹	-	1,96 · 10¹⁵
D (2008)	Ferro fundido 6kW 78%	-	0,40±16%	2,20 · 10 ¹⁰	7,97 · 10 ¹⁰	3,73 · 10 ¹⁵	4,42 · 10 ¹⁴
E₂ (2009)	Ferro fundido 5 kW 79%	0,33±30%	1,10±15%	2,23 · 10¹¹	^a2,16 · 10¹¹	2,14 · 10¹⁵	^a1,46 · 10¹⁵
F (2007)	Ferro fundido 78%	0,55±18%	-	-	9,87 · 10 ¹⁰	-	1,60 · 10 ¹⁵

a = E₂: Ålykkevej 3E

Na Figura 3-22 encontra-se representada a variação de concentração das partículas ultra-finas no exterior (vermelho) e interior (azul) do edifício ao longo do ensaio de combustão decorrido na habitação E₂. Também são apresentados os resultados obtidos por aplicação do modelo numérico de balanço mássico, associados à concentração de partículas (amarelo) e às emissões de partículas ultra-finas (preto) de um fogão a biomassa de ferro fundido (certificado) para o ar interior. Estes resultados reflectem um

valor aproximado (estimativa) do caudal de emissões de partículas ultra-finas, provenientes do sistema de combustão a biomassa (coeficiente de correlação entre os valores estimados e as medições $R = 0,997$).

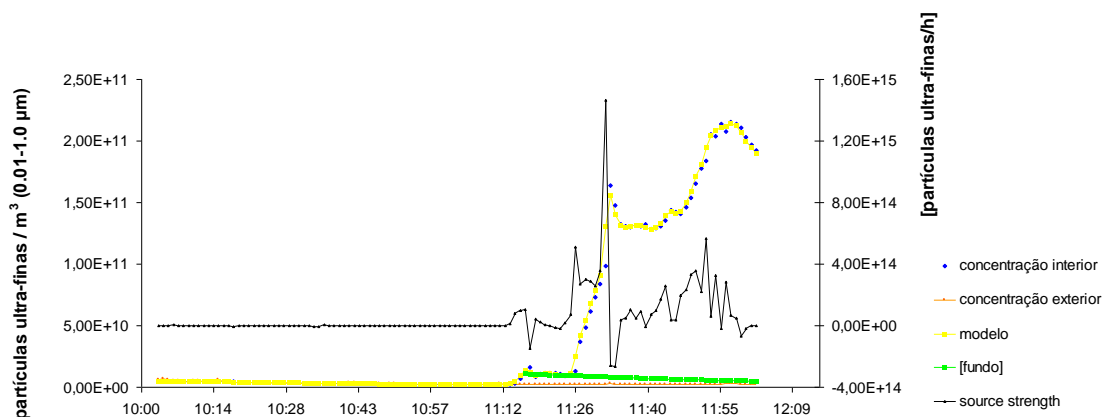


Figura 3-22 Evolução da concentração de partículas ultra-finas ao longo do processo de combustão de um fogão de ferro fundido certificado (Swan) na habitação E₂ - Fevereiro de 2010.

Da observação da Figura 3-22 podemos afirmar que, durante a combustão de madeira num fogão de ferro fundido utilizado na habitação E₂ (taxa de renovação de ar = 1,10) ocorre um aumento da concentração de partículas até ao nível de $2,10 \times 10^{11}$. É possível observar um aumento da taxa de emissão de partículas (*source strength*) para o período logo após o início da combustão. Verifica-se elevada correlação entre os resultados obtidos experimentalmente e o modelo de balanço mássico apresentado nestes capítulos 3, através da aplicação do método de regressão linear (ANEXO A).

Passa-se a apresentar os resultados das medições de partículas ultra-finas na habitação C, durante a combustão de biomassa num fogão de massa térmica em Fevereiro de 2010.

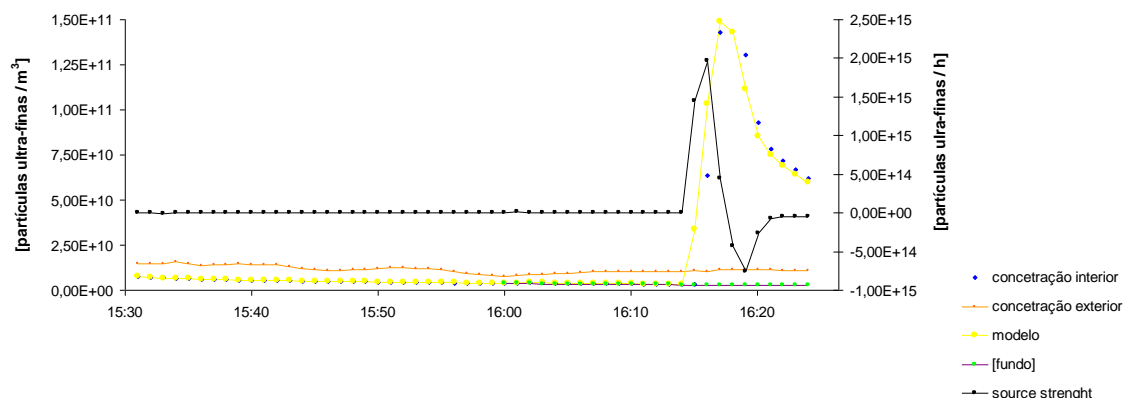


Figura 3-23 Evolução da concentração de partículas ultra-finas ao longo do processo de combustão de um fogão de ferro fundido certificado (*Swan*) na habitação E₂ - Fevereiro de 2010.

Para o caso da habitação C (taxa de renovação de ar = 0,58), onde se utilizou um fogão de massa térmica, verificou-se igualmente uma variação da concentração após o início da combustão de madeira no referido fogão. Neste ensaio de combustão de biomassa, decorrido num dia típico de Inverno, verificaram-se níveis de concentração de partículas ultra-finas da mesma ordem de grandeza dos atingidos para o caso da habitação E₂, no entanto, o tempo de exposição a este nível de concentração foi menor do que para o caso da habitação E₂. Tal facto pode estar associado às diferentes condições de operação do fogão de massa térmica, relativamente aos fogões de ferro fundido.

Da análise dos resultados obtidos para a QAI, podemos concluir que, em geral, durante o período de Primavera e Inverno a operação de fogões a biomassa pode causar impactos na qualidade do ar interior. De entre as causas dos problemas de QAI verificados podem estar os seguintes aspectos

- . Transporte de poluentes do exterior para o interior;
- . Isolamentos inadequados das janelas e portas do fogão;
- . Condições de combustão incompleta provocados pela operação inadequada do sistema;
- . Diferencial de pressão entre o interior e exterior negativo causado pelo sistema de ventilação;
- . Poeiras nas superfícies dos fogões;

- . Utilização inadequada do fogão no momento de ignição da combustão;
- . Design inadequado das entradas de admissão de ar de combustão.



Figura 3-24 Representação da abertura de entrada de ar de combustão secundário numa porta de ferro fundido instalada num fogão de massa térmica – ensaio na habitação C.

Na Figura 3-24 é possível observar a mudança de cor na porta de ferro fundido num fogão a biomassa de massa térmica, após a combustão de biomassa na habitação C.

3.2.6 MEDIÇÕES VS. SIMULAÇÕES

As simulações energéticas desenvolvidas para este caso de estudos representam uma aproximação aos efeitos provocados pela combustão doméstica de biomassa em edifícios residências com dois tipos distintos de características térmicas. Na tabela 3-6 são indicadas as percentagens de energia final produzida a partir do fogão a biomassa, relativamente ao total de energia final gerada, associadas às simulações energéticas e cálculos efectuados na análise de balanço energético às 6 habitações, respectivamente.

Tabela 3-6 Percentagem dos consumos de energia final gerada pela combustão de biomassa para as 6 habitações analisadas neste caso de estudo e respectivos valores obtidos nas simulações energéticas realizadas.

Habitação	Fogão a biomassa	Valores obtidos para 6 habitações	Simulação Dinâmica
		% consumo de biomassa (energia final)	
A (2001)	Ferro fundido 5kW	36	35
B (1977)	Massa térmica 2,5 kW	20	28
C (2006)	Massa térmica 2,5 kW	33	58
D (2008)	Ferro Fundido 5kW	8	35
E (2009)	Ferro Fundido 5kW	23	35
F (2007)	Ferro Fundido	7	-

Podemos concluir que a percentagem de energia final produzida a partir da queima de biomassa para a maioria das habitações em estudo é inferior à fracção considerada no modelo desenvolvido para as simulações energéticas apresentadas. Na realidade, a maioria das habitações consomem uma maior fracção de gás natural ou outro combustível para o aquecimento doméstico de espaços. Esta situação pode estar associada ao facto dos fogões a biomassa serem sistemas manuais que transferem calor para o ambiente interior de forma intermitente.

Por outro lado, as medições de temperatura e consumos energia final nas habitações unifamiliares deste caso de estudo podem ser comparadas com os resultados obtidos nas simulações energéticas. De seguida, passa apresentar-se os resultados da simulação dinâmica vs. medições realizadas para a temperatura no interior das habitações em estudo, bem como os consumos de energia final para cada caso.

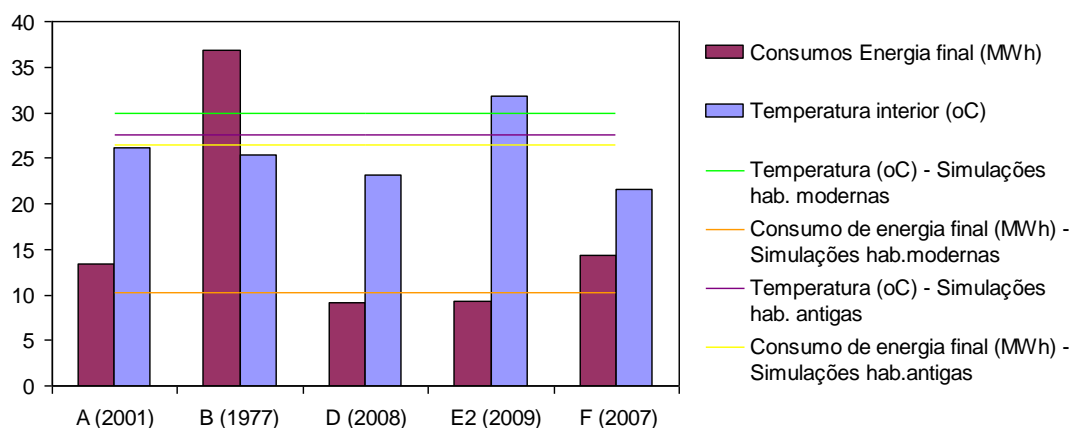


Figura 3-25 Consumos de energia final para aquecimento de espaços e temperaturas máximas atingidas no Inverno nas habitações do caso de estudo e repectivos valores obtidos nas simulações energéticas.

Para o caso da habitação B, sem isolamento térmico, verificaram-se consumos de energia final para aquecimento são superiores aos espaços valores indicados pelo modelo numérico aplicado – programa *BSIM Building Simulation*. Por outro lado, as temperaturas máximas para o período de inverno (valor horário) são superiores aos resultados estimados pelo modelo numérico.

De um modo geral, verifica-se que, os consumos de energia final para aquecimento de espaços das habitações analisadas no caso de estudo são superiores aos valores previstos pelo programa de simulação dinâmica, exceptuando as duas habitações mais modernas. Os valores de máximos temperatura interior na sala de estar da habitação E₂ aproximam-se dos valores previstos pelo modelo. Podemos considerar esta habitação unifamiliar como a moradia que mais se aproxima da habitação tipo Dinamarquesa moderna considerada no modelo numérico desenvolvido.

Sugere-se para trabalhos futuros, o desenvolvimento de uma rotina de programação no software de simulação dinâmica que permita representar a transferência de calor para os ambientes interiores de um modo representativo do que se sucede na realidade.

4 ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DO FOGÃO A BIOMASSA PORTUGUÊS

Foram realizadas amostragens durante a combustão de biomassa para períodos de 30 a 1 hora e 10 minutos. Efectuou-se diversos ciclos de combustão, procurando caracterizar a queima de combustível em habitações. Neste trabalho apresentar-se-ão os resultados obtidos para um ciclo de combustão de madeira Freixo (*Fraxinus Angustifolia Vahl*), durante o qual se verificaram as melhores condições de operação.

Na Tabela 4-1 é apresentada a composição do Freixo utilizado nos ensaios de combustão de biomassa neste caso de estudo. As características da madeira Freixo foram determinadas no âmbito das actividades do projecto financiado pela FCT PTDC/AGR-CFL/64500/2006 “Biomassa lenhosa para produção de energia: desenvolvimento de sistemas sustentáveis de fornecimento de bens e serviços de produção, regulação e conservação”.

Tabela 4-1 Características do Freixo (*Fraxinus Angustifolia Vahl*) utilizado nos ensaios de combustão no fogão típico Português.

PCI (kJ kg _F ⁻¹)	16441
w _{WF} (kg _{H2O} kg _F ⁻¹)	0,058
w _{CF} (kg _C kg _F ⁻¹)	0,4875
w _{HF} (kg _H kg _F ⁻¹)	0,0659
w _{NF} (kg _N kg _F ⁻¹)	0,0033
w _{SF} (kg _S kg _F ⁻¹)	0,0006
w _{OF} (kg _O kg _F ⁻¹)	0,4140
w _{ZF} (kg _Z kg _F ⁻¹)	0,0308

Obtiveram-se dados das temperaturas nos 3 pontos do fogão indicados na Figura 4-1, os caudais de ar de combustão e carga de biomassa para cada intervalo de tempo de 10 segundos, tendo-se procedido ao cálculo de eficiência térmica média para intervalos de 10 minutos.

Com o objectivo de operar o fogão sob condições adequadas, monitorizou-se a temperatura na câmara de combustão do equipamento, para um consumo de biomassa médio de $1,5 \text{ kg h}^{-1}$, para o ensaio de referência realizado com madeira de Freixo. Considerou-se que este tipo de madeira é bastante utilizado no aquecimento residencial em Portugal Continental.

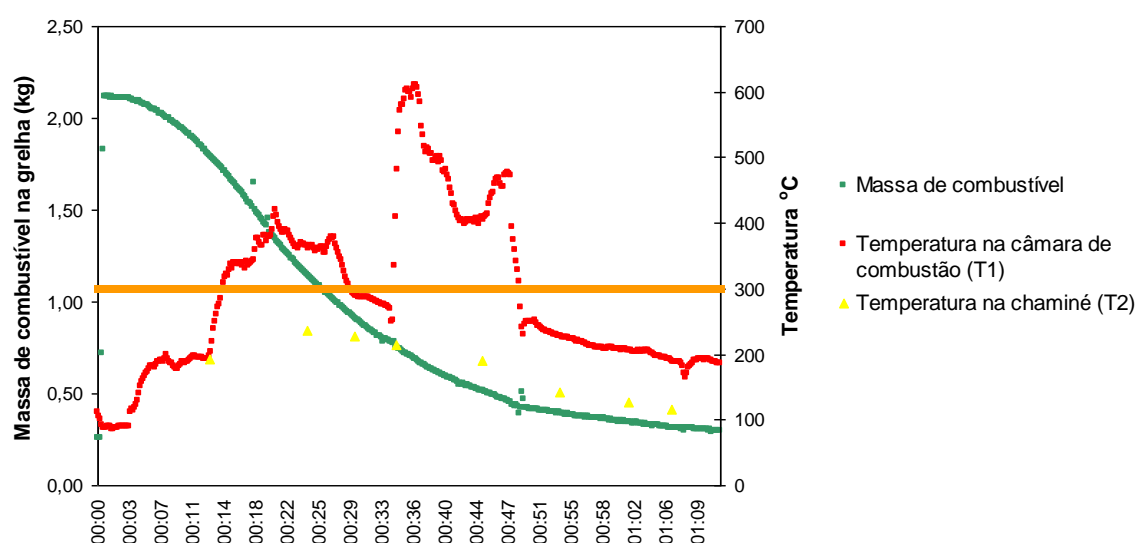


Figura 4-1 Evolução da temperatura de chama na câmara de combustão e carga de biomassa ao longo de um ciclo de combustão da biomassa - Freixo.

Da análise da Figura 4-1 podemos observar que a temperatura na câmara de combustão varia entre os 100 °C e os 600 °C, sendo que durante o ciclo de combustão representado, para um período de aproximadamente 30 minutos, a temperatura na câmara de combustão mantém-se acima dos 300 °C.

É importante referir que, 20 minutos após o início da combustão de biomassa ocorre uma diminuição da temperatura na câmara de combustão. Após a reposição de biomassa que caiu da grelha existente no interior da câmara de combustão, aos 33 minutos, ocorreu um novo aumento de temperatura na câmara de combustão.

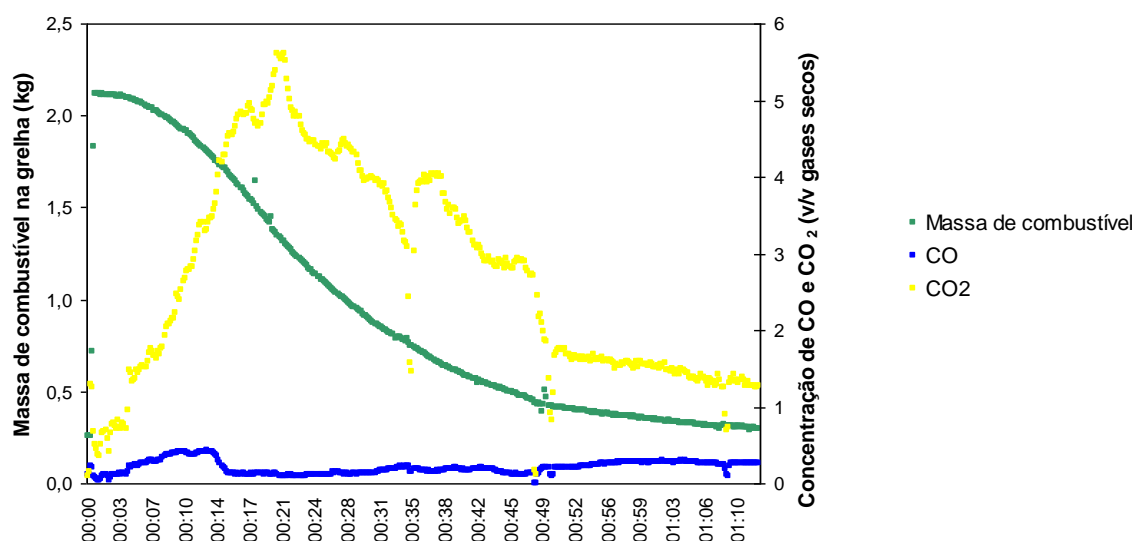


Figura 4-2 Evolução da Concentração CO e CO₂ no fogão a biomassa ao longo de um ciclo de combustão de Freixo.

Da observação da Figura 4-4 verifica-se que as concentrações de CO e CO₂ no efluente gasoso são baixas, sendo que a concentração de CO variou entre os 0,05 e os 0,4 %, enquanto que a concentração de CO₂ não atingiu os 6%.

Durante o período de combustão de biomassa, a concentração de CO atingiu o seu máximo cerca de 12 minutos após o início da queima de biomassa, enquanto que a concentração máxima de CO₂ ocorreu cerca de 20 minutos após o início da combustão de biomassa.

4.1.1 CÁLCULO DE EFICIÊNCIA TÉRMICA DO FOGÃO A BIOMASSA PORTUGUÊS

Com vista a entender melhor como varia a eficiência térmica do recuperador de calor em estudo com a evolução dos restantes parâmetros operacionais, calculou-se o valor médio da eficiência térmica do fogão a lenha típico Português para intervalos de 10 minutos.

Para calcular a eficiência térmica (η) do fogão a biomassa em estudo foi necessário realizar o balanço energético ao equipamento. A eficiência térmica foi calculada com base na Equação 8.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{entrada} - \dot{Q}_{saida}}{\dot{Q}_{entrada}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 8})$$

Sendo $\dot{Q}_{entrada}$ igual à potência adicionada ao volume de controlo recuperador de calor a biomassa e $\dot{Q}_{saída}$ o calor perdido pelo edifício.

No ponto 4.1.1.1 apresentar-se-á o procedimento de cálculo do balanço mássico e no ponto 4.1.1.2 o procedimento de cálculo do balanço energético.

4.1.1.1 BALANÇO MÁSSICO

Nos cálculos realizados considerou-se que a queima de biomassa no fogão a biomassa ocorreu em condições de combustão completa e que não se formaram inqueimados como produtos do processo de combustão de biomassa. Geralmente, em processo de combustão completa de biomassa, temos que:

$$(\text{Biomassa} + \text{Ar de combustão}) = (\text{Gases de combustão} + \text{Cinzas}) \quad (\text{Eq. 9})$$

Afim de determinar a humidade do efluente gasoso na chaminé do fogão a biomassa aplicaram-se as equações de balanço mássico, considerando que o sistema de queima opera em estado estacionário para cada intervalo de 10 minutos.

As necessidades estequiométricas de O_2 podem ser calculadas através da Equação 10 [45]:

$$W_s = 32 \cdot \left[\sum \left(\frac{Y_{s,j} \cdot w_{j,F}}{M_{jF}} \right) - \frac{w_{OF}}{32} \right] \quad (\text{Eq. 10})$$

Correspondendo $Y_{s,j}$ às necessidades estequiométricas de O_2 para oxidar o elemento j, $w_{j,F}$ à fracção mássica do elemento j no combustível F em base seca (bs) e M_j a massa molecular de j.

As necessidades estequiométricas de ar de combustão são determinadas com base na Equação 11 [45].

$$W_{sA} = W_s \cdot \left[1 + 3,76 \cdot \frac{M_{N_2}}{M_{O_2}} + 7,63 \cdot W_{VA} \cdot \frac{M_{H_2O}}{M_{O_2}} \right] \quad (\text{Eq. 11})$$

Sendo W_{VA} a razão de mistura para o ar atmosférico à pressão e temperatura ambiente.

No balanço mássico em causa considerou-se a utilização de diferentes quantidades de excesso de ar (z) para cada intervalo de tempo de 10 minutos, associado ao processo de convecção natural de ar de combustão.

O excesso de ar considerado no balanço mássico ao processo de combustão de biomassa, foi realizado com base nos resultados experimentais obtidos para o caudal volumétrico de ar de combustão em condições PTN (W_a), sendo dado pela Equação 12.

$$z = \left(\frac{W_a}{W_{SA}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 12})$$

De seguida, passa a apresentar-se as equações relativas ao cálculo do número de moles de produtos de combustão da biomassa por kg de combustão de biomassa (base seca) consumida (compostos maioritários resultantes da combustão residencial de biomassa).

$$n_{CO_2} = \frac{w_{CF}}{12} - n_{CO} - (w_{CV} \cdot w_{VF} + w_{CE} \cdot w_{EF})/12 \quad (\text{Eq. 13})$$

Sendo w_{CV} igual à fracção de carbono no material volante, w_{CV} igual à fracção de material volante no combustível biomassa, w_{CE} igual à fracção de carbono nas escórias e w_{EF} igual à fracção de escórias na biomassa.

No caso de estudo apresentado, considerou-se que, em condições de combustão completa se formam quantidades de CO negligenciáveis e que não existe carbono nas escórias nem nos volantes.

$$n_{H_2O} = \frac{w_{HF}}{2} + \frac{w_{WF}}{M_{H_2O}} + W_a \cdot W_{VA} \cdot \frac{7,63}{M_{O_2}} - n_{H_2} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$n_{O_2} = \frac{w_{OF}}{32} + 0,5 \cdot \frac{w_{WF}}{M_{H_2O}} + \frac{W_a}{M_{O_2}} (1 + 0,5 \cdot W_{VA} \cdot 7,63) - n_{CO_2} - \frac{n_{H_2O}}{2} - \frac{n_{CO}}{2} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$n_{N_2} = \frac{w_{NF}}{14} + 2 \cdot \frac{W_a}{M_{O_2}} \cdot 3,76 - n_{NO} \quad (\text{Eq. 16})$$

Sendo que, para as condições de combustão completa se considera negligenciável a quantidade de NO produzido pela reacção de combustão.

Após o cálculo do número de moles dos compostos maioritários resultantes da combustão da biomassa (por kg de combustível queimado), procedeu-se à determinação da humidade do efluente gasoso na chaminé, sendo esta dada pela Equação 17.

$$\%H_2O = \frac{n_{H_2O}}{n_{O_2} + n_{N_2} + n_{H_2O} + n_{CO_2}} \quad (\text{Eq. 17})$$

Na Tabela 4-2 passa-se a apresentar os resultados do cálculo da humidade do efluente gasoso para cada intervalo de tempo de 10 minutos, para diferentes caudais de ar de combustão.

Tabela 4-2 Humidade do efluente gasoso resultante do processo de combustão completa de biomassa, para cada intervalo de tempo.

Tempo (minutos)	Caudal de ar de combustão (Nm ³ h ⁻¹)	Humidade do efluente gasoso (% H ₂ O – v/v)
0	30,85	5,3
10	36,23	4,8
20	38,88	7,3
30	36,82	5,8
40	33,81	6,5
50	32,52	3,2
60	31,19	3,2
70	31,49	3,5

A humidade específica do efluente gasoso apresentada será considerada no ponto 4.1.1.2, no cálculo da potência térmica dos gases de exaustão.

4.1.1.2 BALANÇO ENERGÉTICO

O cálculo da potência gerada e transferida para o volume de controlo em análise é efectuado considerando a taxa de consumo de biomassa e o caudal mássico de ar de combustão durante a combustão de biomassa, sendo necessário conhecer o poder calorífico inferior da biomassa utilizada nos ensaios (PCI_b) e o consumo de biomassa por unidade de tempo (m_b) às condições de pressão de 1 atm e temperatura de 20°C.

Considerou-se como energia térmica fornecida ao “volume de controlo” fogão, a soma da energia produzida pela queima da biomassa (\dot{Q}_b) com a energia transferida para o sistema através do ar de combustão (\dot{Q}_{ac}).

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_b + \dot{Q}_{ac} = \dot{m}_b \cdot PCI_b + \dot{m}_{ac} \cdot h_a \quad (\text{Eq. 18})$$

Sendo \dot{m}_{ac} o caudal mássico de ar de combustão e h_a a entalpia específica do ar atmosférico à temperatura ambiente e pressão ambiente.

A energia à saída do volume de controlo - recuperador de calor - é determinado com base no cálculo da potência térmica dos gases de exaustão (\dot{Q}_{GE}), do calor latente de evaporação da água no processo de combustão da biomassa ($\dot{Q}_{latente}$) e do calor transferido para o interior do edifício em estudo.

$$\dot{Q}_{saída} = \dot{Q}_{GE} + \dot{Q}_{latente} + \dot{Q}_{transferido} \quad (\text{Eq. 19})$$

O calor sensível num processo de combustão completa, perdido através da chaminé, pode ser determinado com base no caudal molar dos gases de exaustão (\dot{n}_i), na capacidade calorífica de cada um dos gases no efluente gasoso na chaminé do recuperador de calor (c_{pi}), na temperatura do efluente gasoso (T_{GE}) e na temperatura de referência ($T^o = 273K$).

O valor da potência térmica dissipada através dos gases de exaustão é dado pela Equação 20:

$$\dot{Q}_{GE} = \sum_{i=1}^{i=n} \dot{n}_i \cdot c_{pi} \cdot (T_{GE} - T^o) \quad (\text{Eq. 20})$$

Para aplicar a equação 20 admitiu-se que, o caudal volumétrico dos gases de combustão (\dot{V}_{NGE}) é igual ao caudal volumétrico do ar de combustão (\dot{V}_{Nac}), em condições normais de pressão e temperatura (PTN).

Com o objectivo de determinar o caudal molar do efluente gasoso na chaminé do fogão a biomassa, calculou-se o caudal volumétrico dos gases de exaustão para a temperatura no interior da chaminé (T_2), através da Equação 21.

$$\dot{V}_{GE} = \frac{\dot{V}_{N_{GE}} \cdot T_a}{T_N} \quad (\text{Eq. 21})$$

Para calcular o caudal molar dos gases de exaustão na chaminé, aplicou-se a Equação 22.

$$\dot{n}_{GE} = \frac{\dot{V}_{GE} \cdot P_{atm}}{R \cdot T_a} \quad (\text{Eq. 22})$$

Após a determinação do caudal molar total dos gases de exaustão e com base na composição do efluente gasoso, determinada experimentalmente, calculou-se o caudal molar para cada composto químico dos produtos da combustão de biomassa, através da Equação 23.

$$\dot{n}_i = \dot{n}_{GE} \cdot (\% \cdot \text{composto}_i) \quad (\text{Eq. 23})$$

Para calcular a capacidade calorífica de cada composto considerou-se que: a capacidade calorífica a pressão constante (c_{pi}) de um gás real puro depende da temperatura a que o gás se encontra, sendo calculada através de um polinómio de terceiro grau, deduzido a partir das tabelas de JANNAF (Stull and Prophet, 1971) [44]. A temperatura (T) considerada neste cálculo corresponde ao valor médio entre a temperatura dos gases.

Desta forma, a capacidade calorífica do ar de combustão (c_{pac}) a pressão constante pode ser determinada através da Equação 24.

$$c_p = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 (1/T)^2 + a_4 T^3 \quad (\text{Eq. 24})$$

Considerando que $1 \text{ cal} = 4,187 \times 10^{-3} \text{ kJ}$

Por outro lado, a energia produzida num processo de combustão completa, devido à mudança de fase da água existente na biomassa, é determinado com base na Equação 25 [45;46]:

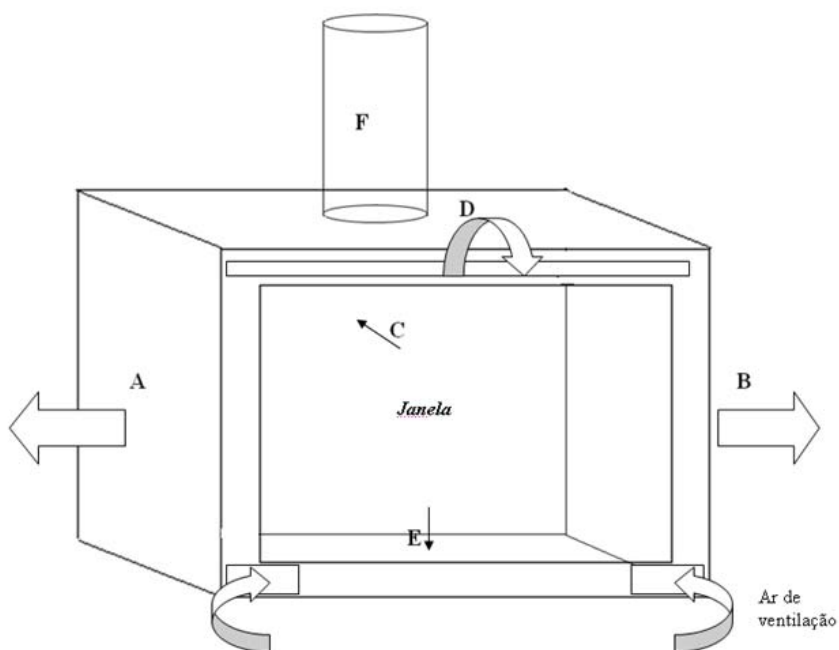
$$\dot{Q}_{latente} = \dot{m}_b \cdot w_{wF} \cdot h_{fg} \quad (\text{Eq. 25})$$

Sendo $w_{wF} = 0,06 \frac{kg_w}{kg_F}$ (humidade da biomassa) e $h_{fg} = 2400 \frac{kJ}{kg}$ (calor latente de vaporização da água à temperatura de referência).

Após o cálculo da potência térmica dissipada do edifício, determinou-se experimentalmente o calor transferido para o interior do edifício, corresponde à soma do calor transferido por convecção e radiação, através das paredes, janela e dos sistema de ventilação de ar atmosférico (Equação 26).

$$\dot{Q}_{transferido} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{cf} \quad (\text{Eq. 26})$$

Na Figura 4-3 encontram-se representados os principais processos de transferência de calor entre as paredes do fogão a biomassa (A, B, C, D e E) e o interior do edifício, bem como a transferência de calor por convecção forçada, processo promovido por um sistema de ventilação instalado no fogão a biomassa. Neste trabalho, apresentar-se-á apenas um valor médio para a transferência de calor das superfícies do fogão a biomassa para o interior do edifício.



Legenda

A	Parede vertical esquerda
B	Para vertical direita
C	Para vertical de trás
D	Parede horizontal superior
E	Parede horizontal inferior
F	Chaminé

Figura 4-3 Representação esquemática dos fluxos de calor nas paredes verticais (setas à esquerda e à direita) e por convecção forçada (Ar de ventilação), entre as paredes do fogão a biomassa e o interior do edifício.

O fluxo de calor por convecção natural entre uma superfície e o ar ambiente podem ser quantificados através da lei do arrefecimento de Newton – Equação 27 [47].

$$\dot{Q}_c = \bar{h}_c \cdot A_s \cdot (T_s - T_a) \quad (\text{Eq. 27})$$

Sendo \bar{h}_c igual ao coeficiente de convecção natural, A_s igual à área da superfície do fogão que transfere calor para o ambiente, T_s a temperatura da superfície do fogão e T_a a temperatura do ar ambiente.

O coeficiente de transferência de calor por convecção é um parâmetro determinado experimentalmente, cujo valor depende da geometria da superfície, da natureza do escoamento do fluido, das propriedades físicas do ar atmosférico [47].

O coeficiente de convecção natural (\bar{h}_c) nas superfícies exteriores do fogão pode ser calculado através da Equação 28, utilizando o número de Reyleigh (Ra_L) e Nusselt (Nu), do coeficiente de condutividade térmica do ar atmosférico (k, considerado igual a $30 \times 10^{-3} \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) para o ar ambiente a 293 K [46]:

$$\bar{h}_c = \frac{Nu \cdot k}{L_c} \quad (\text{Eq. 28})$$

L_c é o comprimento característico das superfícies do fogão, correspondente à sua altura para o caso das placas verticais. No caso da placa horizontal este valor é igual à razão entre a área e perímetro da placa horizontal [46].

O valor do número de Nusselt para placas verticais calculado através da Equação 29 [46]:

$$Nu = \left[0,825 \cdot \frac{0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (\text{Eq. 29})$$

Por outro lado, o número de Nusselt para a superfície das placas horizontais do fogão a biomassa foi calculada com base na Equação 30 [46]:

$$Nu = 0,54 \cdot Ra_L^{1/4} \quad (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7) \quad (\text{Eq. 30})$$

Sendo o número de Ra_L dado pela Equação 31.

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_a) \cdot L_c^3}{\nu^3} \cdot Pr \quad (\text{Eq. 31})$$

Para calcular o Ra_L considerou-se que, o número de Prandtl (Pr) é igual $7,00 \times 10^{-1}$ para o ar ambiente a 293 K, sendo ν igual à viscosidade cinemática do ar ambiente, igual a $4,5 \cdot 10^{-5} m^2/s$ a 293 K e β igual ao coeficiente de expansão volúmica dado pela Equação 32:

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (\text{Eq. 32})$$

T_f é a temperatura de filme sendo dada pela Equação 33, correspondendo ao valor médio entre o ar ambiente e a placa do fogão a biomassa [46].

$$T_f = \frac{T_s + T_a}{2} \quad (\text{Eq. 33})$$

Na Tabela 4-3 são apresentados os resultados do cálculo dos valores médios para os fluxos de calor e respectiva potência térmica dissipada por convecção natural por cada uma superfícies exteriores do fogão, durante o período de óptimo de transferência de calor. Para realizar este cálculo considerou-se a temperatura média das paredes igual a 343 K, para o período de 10 minutos em que se esperam as melhores condições de transferência de calor (aos 30 minutos após o início da combustão).

Tabela 4-3 Fluxos de calor e respectiva potência térmica dissipada (média de 10 minutos) - convecção natural, através das paredes exteriores do fogão.

Placas - superfície	Área	Lc	T paredes (K)	$h_c (W/m^2)$	$Q_c (kW)$
A		0,67			
B	placa vertical	0,30		7,00	0,08
C		0,48	333		0,13
D	placa horizontal	0,14		4,14	0,05
E		0,32			
TOTAL					0,32

Para além de ser transferido calor por convecção natural para o ambiente em aquecimento, as superfícies do fogão a biomassa transferem energia por radiação para o ambiente interior. A radiação é a energia emitida pela matéria através de ondas electromagnéticas, como resultado de mudanças na configuração electrónica dos seus

átomos e moléculas. Ao contrário dos processos descritos anteriormente, a radiação não necessita da existência de um meio interveniente.

A quantidade de radiação térmica pelos materiais constitui um processo de emissão de energia está associada sua temperatura, podendo ser quantificada através da aplicação da lei de *Stefan-Boltzmann* [47].

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_a^4) \quad (\text{Eq. 34})$$

Sendo ε a emissividade da superfície emissora e σ a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$). A emissividade corresponde à fracção de energia que é emitida por radiação relativamente a um corpo negro ($\varepsilon = 1$). Neste trabalho, considerou-se a emissividade da superfície exterior das paredes do fogão igual a 0,8 – valor para o aço oxidado [43].

Tabela 4-4 Potência térmica máxima (média de 10 minutos) – radiação, dissipada através das paredes exteriores do fogão para o ambiente.

Placas - superfície		Área	σ	ϵ	T paredes (°C)	Q _{rad.} (kW)
A	placa vertical	0,30	5,67E-08	8,00E-01	333	0,07
B		0,30				0,17
C		0,48				0,11
D	placa horizontal	0,32				0,07
E		0,32				0,07
TOTAL						0,45

Para finalizar o cálculo do calor transferido do fogão a biomassa para o interior do edifício foi necessário estimar a potência emitida por convecção forçada, promovido por um sistema de ventilação apropriado, bem como a potência perdida pela chaminé através da chaminé para o interior do edifício.

A equação geral utilizada no cálculo da transferência de calor por convecção em estado estacionário de um fluido numa conduta é a dada pela Equação 35 [46]:

$$\dot{Q}_{cf} = \dot{m}_a \cdot \bar{c}_{pi} \cdot (T_{saída} - T_{entrada}) \quad (\text{Eq. 35})$$

Sendo \bar{c}_{pi} o valor médio para a capacidade calorífica do ar atmosférico entre a temperatura ambiente (T) e a temperatura do ar atmosférico a 1 atm e 273 K (T^o). O cálculo da \bar{c}_{pi} foi realizado com base na equação 36 [44].

$$\bar{c}_{pi}(T) = \frac{1}{T_a - T^o} \int_{T^o}^T c_{pi} dT \quad (\text{Eq. 36})$$

A variável \dot{m}_a corresponde ao caudal molar de ar de ventilação total (convecção forçada para o fogão em estudo), considerado $0,4 \text{ mol s}^{-1}$, sendo $T_{entrada}$ e $T_{saída}$ a temperatura do ar ambiente à entrada e saída da conduta por onde passa o ar de convecção forçada, respectivamente [46].

O cálculo do calor transferido da superfície da chaminé (no interior do laboratório) para o ambiente interior foi realizado com base na equação anterior, tendo-se assumido a $T_{saída}$ igual à temperatura atingida na chaminé (T_2) e de $T_{entrada}$ igual à temperatura atingida na entrada da chaminé (T_3).

Na Tabela 4-5 é apresentado um resumo relativo ao balanço energético ao fogão a biomassa típico Português para o período em que a transferência de calor do fogão para o ambiente interior foi mínima e para um intervalo durante o ciclo de combustão (30 minutos após o início da combustão). Os resultados apresentados estão associados a valores médios para intervalos de 10 minutos.

Tabela 4-5 Potência térmica mínima e média dissipada do fogão a biomassa Português para o interior do edifício.

Potência térmica do fogão a biomassa para o interior do edifício	Mínima (kW)	Médio (kW)
Resultados do balanço energético	1,64	6,25
Resultados dos cálculos para a transferência de calor entre o fogão a biomassa e o ambiente em aquecimento		
	(kW)	(kW)
Convecção + Radiação paredes	0,37	0,78
Convecção forçada	0,57	1,42
Calor pela chaminé interior	0,00	0,34
Radiação janela	0,67	3,71

Os resultados apresentados na Tabela 4-5 indicam que, entre 12,4 e 23,0 % dos fluxos de calor transferido para o ambiente interior em estudo são devidos a processos de convecção e radiação através das paredes exteriores do recuperador de calor em análise. Entre 22,8 e 35,6 % da potência emitida para o interior do edifício sucede-se devido a processos de convecção forçada, através do sistema de ventilação forçada integrado no fogão a biomassa da Solzaima. As perdas de calor através da conduta da chaminé integrada no interior do laboratório são bastante pequenas.

Apesar de não terem sido determinados directamente os fluxos de calor por radiação da janela para o interior do edifício, estima-se que, entre 41,3 e 59,3% da energia útil produzida pelo recuperador de calor a biomassa, é emitida para o interior do laboratório pelo processo de radiação através da janela do fogão a biomassa. Por motivos de falta de tempo, não se determinou experimentalmente a quantidade de energia transferida através deste processo.

4.1.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO FOGÃO A BIOMASSA

Os valores médios da eficiência térmica do fogão estudado, para uma carga de biomassa são apresentados na Figura 4-4. O valor médio da eficiência térmica do fogão a biomassa em estudo foi determinado considerando períodos de 10 minutos.

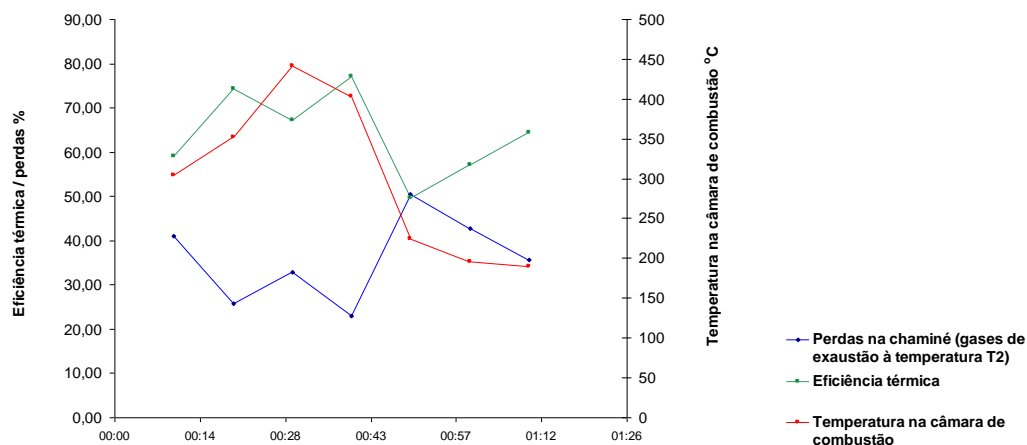


Figura 4-4 Evolução de parâmetros de análise energética ao fogão a biomassa típico Português – medições para cada 10 minutos.

Verifica-se que, a eficiência térmica do fogão a biomassa varia entre os 50 e os 77 %, sendo que a sua evolução acompanha as variações de temperatura na câmara de combustão durante o processo de queima, excepto para a fase final do processo da combustão de biomassa, quando o calor transferido do equipamento para o interior do edifício são muito baixos. Tal facto pode ser justificado pelo arrefecimento da chaminé ao mesmo tempo que as paredes do fogão continuam a dissipar energia para o interior do edifício.

5 DISCUSSÃO

Os fogões a biomassa são sistemas simples que podem ser vistos como uma *tecnologia de transição* para um modelo energético mais sustentável, que nos permitirá reduzir a nossa pegada de CO₂ de origem fóssil. Contudo, experiências realizadas na Dinamarca pelo *National Environmental Research Institute* (NERI) revelaram que, em regiões com elevada densidade de fogões a biomassa, estes sistemas são responsáveis por mais de metade da emissão de partículas finas (do tipo primárias) no país. Em investigações prévias conclui-se que, a tecnologia utilizada e os hábitos de operação dos fogões a biomassa são factores que influenciam consideravelmente as emissões de poluentes atmosféricos [24].

Apesar dos problemas identificados causados pelos fogões a biomassa e a possibilidade de recorrer a outras soluções para aquecimento residencial, em zonas rurais, esta tecnologia continuará a ser utilizada para dar apoio a sistemas de aquecimento centralizado, sendo uma prioridade melhorar o seu desempenho energético, de forma a minimizar os seus impactos no ambiente.

Ao nível da implementação de medidas de eficiência energética em edifícios residenciais as melhores soluções passam sempre pela melhoria das características térmicas dos edifícios, salvaguardando as taxas de renovação de ar novo que garantam a QAI (no mínimo iguais a 0.5 h⁻¹ [15]. Contudo, a implementação de isolamentos térmicos e de novas soluções construtivas poderá aumentar a estanqueidade dos edifícios. Por um lado, esta medida de eficiência energética poderá ter impactos positivos ao nível da conservação da energia nas habitações, podendo por outro lado, diminuir a circulação de ar nos espaços interiores e causar problemas ao nível da QAI, aquando da presença de fontes emissoras no interior das habitações.

O programa de simulação *BSIM – Building Simulation* [48], aplicado na análise energética das habitações unifamiliares Dinamarquesas tipo, permitiu determinar os consumos de energia final e as temperaturas no interior dos espaços em aquecimento durante um ano representativo da utilização da combustão residencial de biomassa em habitações na Dinamarca. Os resultados da simulação térmica e dinâmica para as duas tipologias revelaram consumos de energia final de 86 kWh m⁻² ano⁻¹ para a operação de um fogão a biomassa numa habitação moderna, e de 220 kWh m⁻² ano⁻¹ para a habitação unifamiliar tipo construída na década de 80. O modelo numérico aplicado para representar as habitações da década de 80 apresenta resultados para os quais as necessidades de

energia para aquecimento são superiores às dos edifícios certificados durante este período. Este facto pode ser justificado pelo elevado coeficiente de transmissão térmica considerado para as paredes exteriores do edifício modelo do tipo antigo.

As simulações energéticas apontam para uma pequena redução no consumo de energia final para aquecimento de espaços para o cenário de utilização de fogões de ferro fundido a biomassa, relativamente ao cenário em que não se utilizam fogões. Contudo, para este cenário, considerou-se que os edifícios são climatizados durante a maior parte do dia com recurso a um sistema de aquecimento central a gás natural, programado para um *set point* de temperatura no seu interior igual a 18°C.

Por outro lado, a utilização de fogões de ferro fundido em habitações com elevada eficiência térmica poderá dar a origem a fluxos de calor intermitentes, dos equipamentos para os ambientes interiores e que são inerentes às características de operação destes sistemas manuais de queima de biomassa. Os resultados das experiências realizadas na Dinamarca revelam que podem ser atingidas temperaturas no interior das habitações unifamiliares superiores a 30°C – valores em médias horárias -.para a sala de estar de habitações modernas, sendo a temperatura de conforto de referência estabelecida pelo regulamento Dinamarquês igual a 20 °C.

Em geral, verificou-se que, os fogões de massa térmica operados a biomassa apresentam uma maior inércia térmica, sendo os seus requisitos de operação mais simples, visto que os ciclos de combustão de biomassa destes sistema apresentam uma maior duração, sendo caracterizados por uma menor intermitência relativamente à energia térmica emitida.

Do cálculo de balanço energético realizado para as habitações analisadas no caso de estudo da Dinamarca, verificou-se que a maioria das residências apresenta consumos de energia final superiores aos valores estabelecidos pelos diferentes regulamentos de edifícios estabelecidos para os respectivos anos de construção. No entanto, a habitação C, onde se utilizou um fogão de massa térmica apresentou um consumo de energia final para aquecimento de espaços inferior ao valor limite estimado pelo SBi, com base no BR 2008 (Legislação Dinamarquesa para os edifícios) [15].

Da pesquisa realizada acerca das condições de operação dos fogões de ferro fundido a biomassa comercializados na Dinamarca concluiu-se que, tipicamente, estes sistemas de aquecimento residencial apresentam eficiências térmicas da ordem dos 80%, operando com caudais de ar de combustão que variam entre os 25 e os 30 Nm³/h e um consumo de biomassa que varia entre os 1,7 e os 3,0 kg h⁻¹.

Da análise geral à QAI em 5 habitações na Dinamarca, concluiu-se que, para as habitações com taxas de renovação de ar novo superiores a $0,5 \text{ h}^{-1}$ não se verificam impactos da combustão de biomassa na QAI em termos da concentração de CO, COVs totais e partículas PM_{10} e PM_1 . Contudo, as concentrações no interior das habitações com taxas de renovação de ar mais baixas que $0,5 \text{ h}^{-1}$ e com elevada estanqueidade (moradia E₁ e E₂) podem atingir valores próximos dos valores de referência estabelecidos para a monitorização da QAI em edifícios pela legislação Portuguesa (RSECE), e pelas *Guidelines* publicadas pela OMS. Verificaram-se também níveis de concentração de CO₂ próximos dos valores de referência estabelecidos pelo RSECE para a maior parte das habitações, facto que pode estar associado à presença dos participantes deste estudo na zona próxima do fogão a biomassa, durante o período em que decorreram as diferentes experiências.

É importante realçar que, a aplicação do RSECE está associada a edifícios com potência instalada para climatização superior a 25 kW, não se aplicando directamente ao caso de estudo. A comparação realizada, entre os resultados obtidos na análise de QAI em habitações unifamiliares na Dinamarca e as concentrações máximas de referência estabelecidas pelo RSECE, permite-nos apenas ter uma ideia dos níveis de concentração de poluentes em ambientes interiores que podem ter impactos na saúde humana.

Os resultados das duas campanhas de medição de partículas ultra-finas e a estimativa efectuada para a emissão de partículas ultra-finas nas habitações do caso de estudo evidenciam os impactos da combustão dos fogões a biomassa na QAI de todos os edifícios analisados. Verificou-se que, os caudais de emissão deste tipo de partículas são maiores nas habitações C (2006) e E₂ (2009), sendo as concentrações máximas de partículas ultra-finas mais elevadas para as habitações C, E₂ e F (2007).

Considerando os impactos que a combustão residencial de biomassa pode causar na QAI, considera-se que, é importante analisar de forma mais detalhada as causas das emissões de partículas, associadas à taxa de renovação de ar dos espaços e às condições de operação dos equipamentos. Algumas das possíveis medidas de melhoria a implementar nestes sistemas de aquecimento a biomassa incluem:

- Intalar filtros para partículas na chaminé destes equipamentos;
- Intalar filtros para partículas nas tomadas de admissão de ar de insuflação;
- Projectar as tomadas de admissão de ar de insuflação de modo adequado, afastadas das chaminés das habitações;

- Implementar isolamentos nas chaminés dos fogões de modo a promover o escoamento adequado dos gases de exaustão;
- Implementar sistemas de controlo dos parâmetros de operação na câmara de combustão, com vista à monitorização da temperatura de chama e dos caudais de ar de combustão (possibilidade de injeção de ar secundário);
- Projectar de forma adequada as entradas de injeção de ar secundário caso existam;
- Integrar isolamentos nas portas dos fogões a biomassa, de forma a melhorar a sua estanquicidade;
- Difundir informação acerca das melhores práticas para utilização dos sistemas de queima de biomassa em estudo.

Da análise ao fogão a biomassa Português conclui-se que, estes sistemas apresentam eficiências que podem variar entre os 50% e os 77%, dependendo da fase do ciclo de combustão de biomassa, sendo que a temperatura na câmara de combustão neste tipo de sistemas varia entre os 100 e os 600 °C. Do cálculo da eficiência para diferentes intervalos de tempo, podemos verificar que a transferência de calor do fogão para o interior do edifício durante a combustão de biomassa é máxima para temperaturas na câmara de combustão superiores a 400 °C e caudais de ar de combustão de 30 Nm³ h⁻¹.

Do cálculo da potência térmica emitida do fogão a biomassa para o interior do edifício, estima-se que a maior contribuição esteja associada à transferência de calor por convecção forçada, através do sistema de ventilação instalado no fogão (valor médio de 1,42 kW). Apesar de não terem sido calculados os fluxos de calor por convecção e radiação através da janela do fogão a biomassa, estimou-se o valor da potência térmica emitida através da janela, com base no valor médio da potência térmica do fogão a biomassa calculada através do balanço energético a este sistema (valor médio de 6,25 kW).

O balanço energético ao fogão permitiu também concluir que, a transferência de calor por radiação através da janela do fogão a biomassa poderá ser um dos principais processos de transferência de calor para os edifícios, contribuição essa que pode ser da ordem dos 50%, aquando atingidas as condições de máxima emissão de potência térmica.

6 CONCLUSÕES

Da análise energética e à QAI realizada em habitações Dinamarquesas conclui-se que, é fundamental melhorar as condições de operação dos sistemas de aquecimento a biomassa manuais em habitações residenciais, a fim de garantir uma combustão mais completa e limpa.

Apesar da elevada eficiência térmica determinada para os fogões a biomassa de ferro fundido, concluiu-se que, estes sistemas geram fluxos de calor de forma intermitente, o que poderá conduzir ao sobre aquecimento das habitações mais modernas e a perdas de energia térmica que poderia ser armazenada.

Por outro lado, apesar dos impactos causados pela combustão de biomassa na QAI poderem ser minimizados, caso os edifícios sejam dotados de sistemas de ventilação adequados, é importante implementar medidas de eficiência energética ao nível da operação dos fogões a biomassa.

A combustão residencial de biomassa deverá ser controlada, assegurando a temperatura de chama adequada, sendo que o caudal de ar de combustão deverá satisfazer as necessidades de O_2 exigidas pelo processo para atingir uma eficiência de conversão do combustível adequada, sem que ocorra uma diminuição indesejada da temperatura na câmara de combustão. A implementação de um *design* adequado da câmara de combustão que garanta maiores tempos de retenção e um nível mais elevado de turbulência dos gases de combustão no seu interior pode ser a chave para melhorar a performance energética e ambiental deste tipo de sistemas de aquecimento. Para complementar estas medidas de eficiência energética ao nível dos equipamentos, sugere-se o desenvolvimento e a implementação de sistemas de controlo para operação dos fogões a biomassa a uma temperatura de chama elevada (acima dos 400 °C) e a injeção de ar de combustão secundário.

Mais medidas de melhoria em termos tecnológicos podem ser implementadas para diminuir os efeitos do comportamento intermitente deste tipo de sistemas, através da projecção de sistemas de armazenamento de energia. A integração de materiais de mudança de fase ou de outros componentes com maior inércia térmica que o ferro fundido, pode melhorar a eficiência térmica dos fogões de ferro fundido a biomassa.

Sugere-se para futuros trabalhos nesta área, um estudo mais detalhado dos fluxos de calor envolvidos entre os fogões a biomassa e os edifícios - cálculo dinâmico, bem como

a análise dos impactos da combustão de biomassa na emissão de partículas finas e ultra-finas, com o objectivo de melhor compreender as causas do aumento de concentração destes poluentes em habitações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

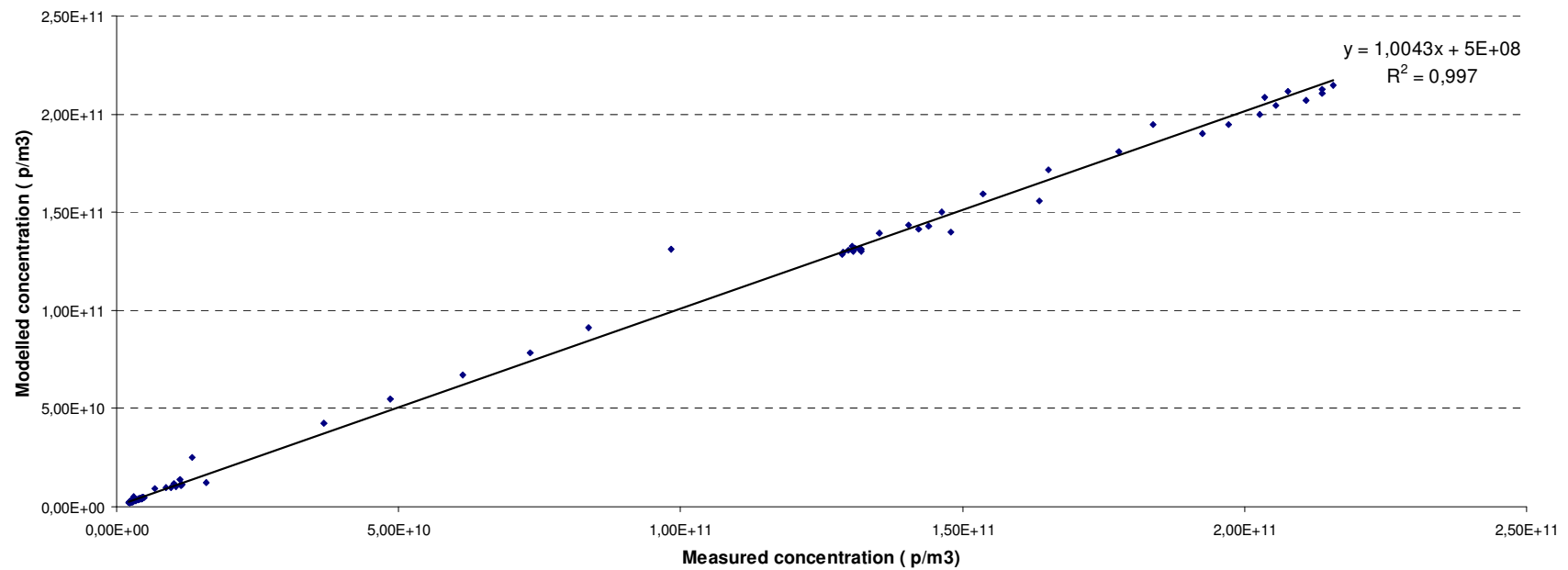
- [1] Comissão europeia (2002): “Directiva 2002/91/CE sobre o desempenho energético dos edifícios”, Parlamento Europeu e do Conselho, pp. 65 - 71.
- [2] Tarelho, L. (2009): Biomassa e bioenergia, apontamentos da disciplina de Conversão de Energias Renováveis, Universidade de Aveiro.
- [3] New York State Energy Research and Development Authority (2008). Biomass combustion in Europe Overview on technologies and regulations, pp. 7-15; 87-88.
- [4] New York City Global Partners (2009): Best Practice: District Heating System; City of Copenhagen, Denmark.
- [5] Ministério da Economia e Inovação (2007): Energias renováveis em Portugal – Portugal 2007, pp. 24-27.
- [6] Danish Board of District Heating: District Heating in Copenhagen, An Energy Efficient, low carbon, and cost effective energy system, Denmark.
- [7] Keiding, L., Gunnarsen, L., Machon, N.R.M., Møller. R., et al. (2003): Environmental factors of everyday life in Denmark – with special focus on housing environment. Edited by Lis Keiding. (In Danish with summary in English), National institute of Public Health, Copenhagen.
- [8] Fernandes. P. A. (2009): Emissão de PM_{2.5} e gases em sistemas domésticos de queima de biomassa, Tese de Mestrado de Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro.
- [9] Afshari, A.a; Jensen Michael, O.; Bergsøe C. N., Carvalho Teles, R. (2009): The impact of using different wood-burning stoves including ignition on indoor particle concentrations, Danish Building Research Institute – Denmark, Conferência Clima 2010, Antalya.
- [10] Danish Standard (2007): Roomheaters fired by solid fuels – Requirements and test methods, EN 13240:2003, Denmark.
- [11] Danish Standard (2001): Inset appliances including open fires fired by solid fuels, EN 13229:2001, Denmark.
- [12] Borrego, C.; Valente, J.; Carvalho, A.; Sá, E.; Lopes, M.; Miranda, A. (2009): Contribution of residential wood combustion to PM10 levels in Portugal, Atmospheric and Environment, Volume 44, pp. 642-651.

-
- [13] Europa Press Releases Rapid (2003): Indoor Air Pollution New EU research reveals higher risks than previously thought – Consultado em Maio de 2010: <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/03/1278>.
- [14] Ministério da Economia (2006): Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), Decreto-Lei 80/2006, pp. 2470-2477.
- [15] The Danish Ministry of Economic and Business Affairs (2007): Danish building regulations 2008, pp. 116-128.
- [16] Frandsen, L. K.; Bleibach, M. (2009): Planta de arquitectura de Estate Hillerød A/S. Consultado em Novembro de 2009: www.esrumhave.dk.
- [17] Martins, N. (2009): Metodologia de Simulação Dinâmica, Apontamentos da disciplina de Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado (AVAC), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- [18] Ministério da Economia (2006): Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização de edifícios (RSECE), Decreto Lei 79/2006, pp. 2429-2431.
- [19] James, F.; William A. (2001): CRC Materials Science and Engineering Handbook, 3rd edition. Consultado em Maio de 2010: <http://www.ruthtrumpold.id.au/designtech/pmwiki.php?n=Main.TimberNew>
- [20] Molnár, P.; Gustafson, P.; Johannesson, S.; Boman, J.; Barrega, L.; Sallsten (2005): Domestic wood burning and PM_{2.5} trace elements: Personal exposures, indoor and outdoor levels, Atmospheric Environment, Volume 39, 2643–2653.
- [21] Nordic Labelling (2006): Nordic Ecolabelling Closed Fireplaces, version 2.2.
- [22] Solzaima (2009): Catálogo da Solzaima, Soluções para Aquecimento a Biomassa.
- [23] Tarelho, L.A.C., Matos M.A.A. (2007): “Caracterização das condições de combustão de biomassa florestal num recuperador de calor doméstico”, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Conferência Nacional de Ambiente, Aveiro.
- [24] National Research Institute (2010): Contribution to air pollution from residential wood combustion. Consultado em Junho de 2010: http://www.dmu.dk/International/News/Wood_combustion.htm.
- [25] Sternhufvud, C^a; Karvosenoja, N^b; Illerup, J^c; Kindbom, K^a; Lukewille, A.^d; Johansson, M.^e; Jensen, D.^c (2004): Particulate matter emissions and abatement options in residential wood burning in the Nordic countries”, Swedish Environmental Research Institute^a; Finish Environment Institute^b; National Environmental Research Institute^c; Norwegian Institute for Air Research^d; UNECE^e, Nordic Council of Ministers, Copenhagen.
-

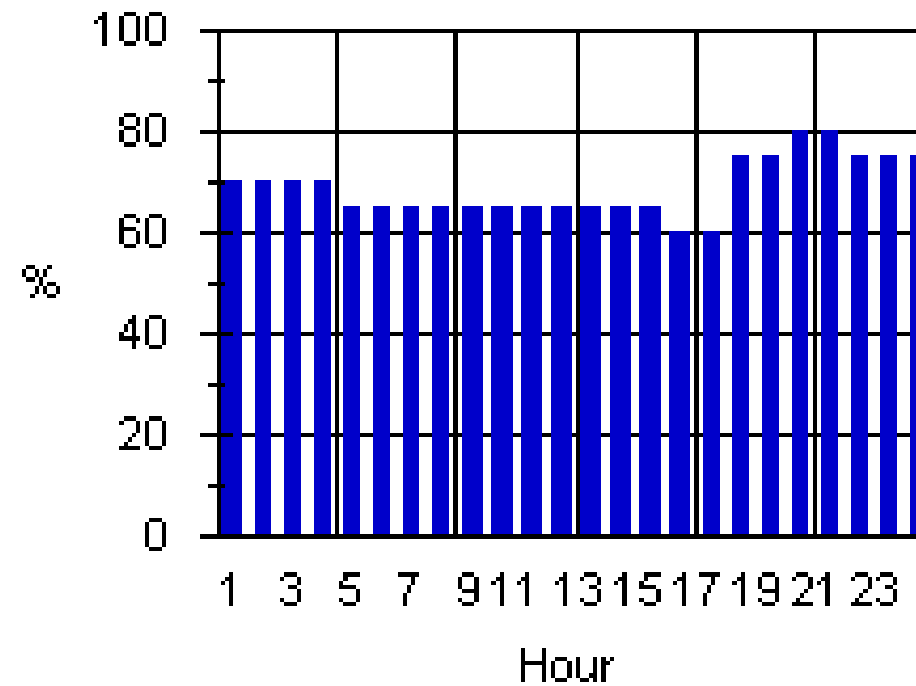
-
- [26] Sheela, Dr.; Basrur, V. (2002): Air pollution from wood burning fireplaces and stoves, Toronto Public Health, pp. 8-9.
- [27] Maroni M., Seifert B., Lindvall T. (1995): Indoor Air Quality: A comprehensive reference book, Air Quality Monographs, Volume 3, pp 1-6, pp 91-98.
- [28] Verma, V.K., Bram, S., Ruyck, J. (2009): Small scale biomass heating systems: Standards, quality labelling and market driving factors – An EU outlook, Biomass and Bioenergy, Volume 33, pp. 1393-1402.
- [29] SP Swedish National Testing and Research Institute (2009): Emission of small particles from biomass combustion, Sweden.
- [30] Palmgren, F.; Wåhllin, P.; Kildesø, J.; Afshari, A.; Fogh, Christian L. (2003): Characterization of particle emissions from driving car fleet and the contribution to ambient and indoor particle concentrations, Physics and Chemistry On The Earth, Volume 28, pp. 327-334.
- [31]. Fanger, P. O.; Valbjørn O. (1978): Indoor Climate, Effects on human comfort, performance, and health, Danish Building Research Institute, First International Indoor Climate Symposium in Copenhagen, pp. 39-42.
- [32] Dimitroulopoulou, C.; Ashmore, M.R.; Hill, M.A., Byrne, R., Kinnersley, R. (2006): INDAIR: A probabilistic model of indoor air pollution in UK homes, Atmospheric Environment, Volume 40 6362–6379
- [33] Matson, U. (2004): Indoor and outdoor concentrations of ultrafine particles in some Scandinavian rural and urban areas, Science of The Total Environment, Volume 343, pp. 169-176.
- [34] Chaloulakou, A.; Mavroidis, I. (2002): Comparison of indoor and outdoor concentrations of CO at a public school. Evaluation of an indoor air quality model, Atmospheric and Environment, Volume 36, pp. 1769-1781.
- [35] Organização Mundial de Saúde, Regional Office for Europe (2002): Air Quality Guidelines for Europe, Switzerland.
- [36] Naussbaumer, T.; Doberer, A.; Klippel, N.; Bühler, R.; Vock, W. (2008): Influence of ignition and operation type on particles emissions from residential wood combustion, 16th European Biomass Conference and Exhibition, June 2008, Valencia, Spain.
- [37] Lévesque, B.; Allaire, S.; Gauvin, D., Koutrakis, P., Gingras, S.; Rhainds, M., Prud'Homme, H. (2001): Wood-burning appliances and indoor air quality, Science of The Total Environment, Volume 281, pp. 47-62.
- [38] Morsø (2009): Återforsaljarprilista, Denmark.
- [39] Andresen, P.; Helbro, L. (1996): Afprøvning af Stenovne, Danish Technological Institutea, Denmark.
-

-
- [40] Camacho, J. (2008): Desenvolvimento dum modelo dinâmico aplicado à combustão de cargas de biomassa em fogões domésticos, Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro.
- [41] Bergsøe, N. (1992): Passiv sporgasmetode til ventilationsundersøgelser, Danish Building Research Institute, Denmark, pp. 43-45.
- [42] Afshari, A., Ekberg, L., Matson, U. (2003): Modelling of Indoor Concentrations of Ultra Fine Particles Based On Laboratory Measurements, Proceedings of Healthy Buildings, Volume 2, pp. 205 – 211.
- [43] Matson, U. (2004): Comparison of the modelling and the experimental results on concentrations of ultra-fine particles indoors, Building and Environment, Volume 40, pp. 996-1002.
- [44] Matos, A.; Pereira, A. (2005): Apontamentos da disciplina de Técnicas de Tratamentos de Efluentes Gasosos, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.
- [45] Matos, A. (2008): Apontamentos da disciplina de Conversão de Energias Convencionais, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.
- [46] Incropera, F.; Dewitt, D.; Bergman, T.; Lavine, A. (2006): “Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th edition”.
- [47] Çengel. Yunus, A. (2006): Heat and Mass Transfer – A Practical Approach, Mc Graw Hill 3rd Edition.
- [48] Danish Building Research Institute – Aalborg University (2009): BSIM – Building Simulation. Consultado em Julho de 2010: www.bsim.dk.

Anexo A – Resultados dos testes de correlação entre os resultados obtidos pelo modelo de balanço mássico (A., Alireza et al. 2003) e das medições para partículas ultra-finas realizadas no edifício E em Fevereiro de 2010.



Anexo B – Diagrama de carga para os fogões de tijolo (mansory stoves) de 8-10 kW de potência térmica – simulação em BSIM.



Anexo C – Características dos equipamentos utilizados em medições de parâmetros de conforto térmico e qualidade do ar interior.

Equipamento	P-Track Model 8525	Model 3007 CPC	Tiny Tags	Tiny Tags	Laser II-110
Parâmetro	Partículas (p cm ⁻³)	Partículas (p cm ⁻³)	Temperatura	Humidade relativa (%)	Partículas (p ft ⁻³)
Gama de medição	0,01 - 5,00 x 10 ⁵	0,00 – 1,00 x 10 ⁵	(-30) - 50	0-95	< 500000
Gama de dimensões (em)	0,02 - > 1,00	0,01 – 1,00			> 0,10
Gama de temperatura (°C)	0 – 38	10 – 30			
Caudal de aspiração (cm ³ /min.)	700	700			
Dimensões (cm ³)	53 x 36 x 21	29,2 x 14 x 14			45 x 35 x 32
Peso (kg)	1,7	1,7			
Observações					várias gamas de partículas 0,1 - >10µm